ReGeo ISSN: 2177-3246

DESAFIOS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO CAROÇO DE AÇAÍ NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA CIRCULAR NA AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA

CHALLENGES FOR ENERGY UTILIZATION FROM AÇAÍ SEEDS IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR BIOECONOMY IN THE BRAZILIAN LEGAL AMAZON

DESAFÍOS PARA LA UTILIZACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE SEMILLAS DE AÇAÍ EN EL CONTEXTO DE LA BIOECONOMÍA CIRCULAR EN LA AMAZONÍA LEGAL BRASILEÑA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-249

Data de submissão: 27/07/2026 **Data de publicação:** 27/08/2026

Julio Cesar Pinho Mattos
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: eng.juliomattos@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2529-9315

Savio Henrique de Barros Holanda
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: savioholanda05@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0003-1311-1279

Antônio Rodrigues de Brito
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco
E-mail:brito.antonio@gmail.com

José Fernando Thomé Jucá
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: jucah@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8956-7905

RESUMO

A Amazônia brasileira, rica em cadeias agroextrativistas, gera volumes significativos de biomassa residual subutilizada, como o caroço de açaí (*Euterpe oleracea Mart., Euterpe precatoria Mart*), que representa um passivo ambiental relevante. Este estudo avaliou o potencial metanogênico do caroço de açaí amazônico como substrato para a produção de biogás, utilizando rúmen bovino como inóculo em ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) em batelada, sob condições mesofílicas (37 °C). A caracterização físico-química e elementar do caroço de açaí revelou uma biomassa lignocelulósica com alto teor de carbono volátil (91,76% m/m) e uma relação C/N de 36,8:1, além de uma composição fibrosa de 49,21% de celulose, 28,33% de hemicelulose e 21,96% de lignina. Os resultados dos ensaios BMP demonstraram que a co-digestão do caroço de açaí com rúmen bovino promoveu um efeito sinérgico positivo na produção de metano, com concentrações de CH_4 entre 3,8% e 4,2% e de CO_2 entre 21,5% e 23,5%. Em contraste, os ensaios com caroço de açaí isolado (com água) e rúmen isolado apresentaram produção nula ou residual de metano. A estabilidade do pH nos ensaios de co-digestão (6,86 a 6,87) foi crucial, evidenciando o papel tamponante do rúmen. Embora as concentrações de metano obtidas sejam consideradas moderadas em comparação com biogás de alta qualidade, elas indicam a viabilidade da co-digestão e a capacidade do rúmen em mitigar a recalcitrância lignocelulósica do caroço de açaí. Este trabalho estabelece uma base para a valorização

energética do caroço de açaí na bioeconomia amazônica, sugerindo a necessidade de pré-tratamentos avançados e otimização da co-digestão para maximizar a eficiência do processo e a produção de biogás de maior qualidade, além de explorar rotas tecnológicas inovadoras como biochar avançado, nano biochar e a biorrefinaria para produtos de alto valor agregado.

Palavras-chave: Caroço de Açaí. Rúmen Bovino. Digestão Anaeróbia. Biogás. Bioeconomia Amazônica. Potencial Metanogênico.

ABSTRACT
The Brazilian Amazon, rich in agro-extractive chains, generates significant volumes of underutilized residual biomass, such as assai seeds (*Euterpe oleracea Mart., Euterpe precatoria Mart*), which represent a relevant environmental liability. This study evaluated the methanogenic potential of Amazonian açaí seeds as a substrate for biogas production, using bovine rumen as inoculum in batch Biochemical Methane Potential (BMP) assays under mesophilic conditions (37 °C). Physicochemical and elemental characterization of açaí seeds revealed a lignocellulosic biomass with high volatile carbon content (91.76% m/m) and a C/N ratio of 36.8:1, in addition to a fibrous composition of 49.21% cellulose, 28.33% hemicellulose, and 21.96% lignin. BMP assay results demonstrated that co-digestion of açaí seeds with bovine rumen promoted a positive synergistic effect on methane production, with CH_4 concentrations between 3.8% and 4.2% and CO_2 between 21.5% and 23.5%. In contrast, assays with isolated açaí seeds (with water) and isolated rumen showed null or residual methane production. pH stability in co-digestion assays (6.86 to 6.87) was crucial, highlighting the buffering role of the rumen. Although the methane concentrations obtained are considered moderate compared to high-quality biogas, they indicate the feasibility of co-digestion and the rumen's ability to mitigate the lignocellulosic recalcitrance of açaí seeds. This work establishes a solid foundation for the energetic valorization of açaí seeds in the Amazonian bioeconomy, suggesting the need for advanced pretreatments and optimization of co-digestion to maximize process efficiency and higher quality biogas production, as well as exploring innovative technological routes such as biorefinery for high-value-added products.

Keywords: Assai Seed. Bovine Rumen. Anaerobic Digestion. Biogas. Amazonian Bioeconomy. Methanogenic Potential.

RESUMEN
La Amazonía brasileña, rica en cadenas agroextractivas, genera volúmenes significativos de biomasa residual subutilizada, como la semilla de açaí (Euterpe oleracea Mart., Euterpe precatoria Mart), que representa un importante problema ambiental. Este estudio evaluó el potencial metanogénico de la semilla de açaí amazónica como sustrato para la producción de biogás, utilizando rumen bovino como inóculo en ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) por lotes en condiciones mesófilas (37 °C). La caracterización fisicoquímica y elemental de la semilla de açaí reveló una biomasa lignocelulósica con un alto contenido de carbono volátil (91,76 % p/p) y una relación C/N de 36,8:1, además de una composición fibrosa de 49,21 % de celulosa, 28,33 % de hemicelulosa y 21,96 % de lignina. Los resultados de los ensayos BMP demostraron que la codigestión de semillas de açaí con rumen bovino promovió un efecto sinérgico positivo en la producción de metano, con concentraciones de CH_4 entre 3,8 % y 4,2 % y concentraciones de CO_2 entre 21,5 % y 23,5 %. En contraste, los ensayos con semillas de açaí aisladas (con agua) y rumen aislado mostraron una producción de metano nula o residual. La estabilidad del pH en los ensayos de codigestión (6,86 a 6,87) fue crucial, lo que resalta el papel amortiguador del rumen. Si bien las concentraciones de metano obtenidas se consideran moderadas en comparación con el biogás de alta calidad, indican la viabilidad de la codigestión y la capacidad del rumen para mitigar la recalcitrancia lignocelulósica de la semilla de açaí. Este trabajo

sienta las bases para la valorización energética de las semillas de açaí en la bioeconomía amazónica, sugiriendo la necesidad de pretratamientos avanzados y la optimización de la codigestión para maximizar la eficiencia del proceso y la producción de biogás de mayor calidad, así como la exploración de rutas tecnológicas innovadoras como el biocarbón avanzado, el nanobiocarbón y la biorrefinería para la obtención de productos de alto valor añadido.

Palabras clave: Semilla de Açaí. Rumen Bovino. Digestión Anaeróbica. Biogás. Bioeconomía Amazónica. Potencial Metanogénico.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira concentra cadeias agroextrativistas que geram grandes volumes de biomassa residual ainda subutilizada do ponto de vista energético. Entre esses fluxos, o caroço de açaí (*Euterpe oleracea* Mart., *Euterpe precatoria* Mart.) destaca-se pela escala de geração, pela concentração territorial e pelos impactos ambientais associados ao manejo inadequado. Representando a maior fração em massa do fruto e sendo frequentemente descartado em lixões, margens de igarapés e áreas urbanas, esse resíduo constitui um passivo ambiental relevante nas principais regiões produtoras da região Norte (LAURINDO et al., 2023).

A região Norte do Brasil é a maior produtora de açaí, e o estado do Acre, em particular, tem uma participação significativa nessa produção. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção de açaí (fruto) no Acre foi de 4.428 toneladas em 2022, 4.030 toneladas em 2023 e 4.145 toneladas em 2024. O município de Feijó (AC) se destaca como um dos principais produtores do estado, registrando 1.750 toneladas em 2022, 1.500 toneladas em 2023 e 1.600 toneladas em 2024. É importante ressaltar que, no Acre, a espécie predominante é o açaí solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.), encontrado em todos os municípios (SILVA, 2011).

O aumento da demanda nacional e internacional pela polpa de açaí ampliou a relevância econômica da cadeia, mas intensificou os problemas relacionados ao descarte dos resíduos, sobretudo em centros urbanos e periurbanos da Amazônia. Estudos de caso mostram acúmulo de caroços em áreas de disposição precária, com emissão de odores. Avaliações recentes em sistemas isolados da região Norte reforçam que esses resíduos podem constituir insumos estratégicos para sistemas descentralizados de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis caros e logisticamente críticos, como o óleo diesel (PEREIRA, 2025; NAZARIO, 2023).

Do ponto de vista energético, o caroço de açaí é uma biomassa lignocelulósica com propriedades compatíveis com rotas de valorização termoquímica e bioquímica. Trabalhos clássicos para a Amazônia destacam baixo teor de cinzas, umidade moderada quando adequadamente manejado e poder calorífico superior em torno de 16 MJ kg^{-1}, com composição elementar típica de biomassas usuais (C ≈ 48%; H ≈ 5,5%) (SEYE et al., 2008; MONTEIRO et al., 2021). Em termos de balanço de massa, aproximadamente 60–70% do fruto processado correspondem a resíduos (caroço, finos e extrato); assim, para cada tonelada de açaí beneficiado, pode ser gerada aproximadamente até uma tonelada de resíduos sólidos (caroço somado ao cacho do açaí), a depender do arranjo tecnológico da unidade de processamento (FRAGOSO et al., 2014; LIMA et al., 2021).

Nesse contexto, o biogás surge como vetor central da bioeconomia amazônica, ao permitir a conversão de resíduos agroextrativistas em energia térmica, elétrica e combustíveis renováveis

(biometano), com coprodutos de interesse agrícola (digestato). A digestão anaeróbia (DA) apresenta vantagens particulares para a realidade amazônica: possibilidade de implantação em pequena e média escala, elevada robustez operacional, capacidade de tratar resíduos heterogêneos e combinação com outros recursos energéticos locais (por exemplo, fotovoltaico em sistemas híbridos).

A literatura sobre digestão anaeróbia de resíduos de frutas, incluindo cascas, bagaços e sementes, evidencia potenciais metanogênicos da ordem de 100–350 NmL CH_4 g^{-1} SV, com forte influência da composição química, da presença de compostos inibidores e da origem do inóculo (MATA-ALVAREZ et al., 2017; EDWIGES et al., 2017; SANTOS et al., 2022). Entretanto, para o caroço de açaí, ainda são escassos os dados específicos de Potencial Bioquímico de Metano (BMP), em especial quando se buscam configurações representativas da realidade amazônica, como o uso de rúmen bovino enquanto inóculo único, abundante em matadouros regionais e rico em microrganismos especializados na degradação de fibras.

Considerando esse cenário, a quantificação do potencial metanogênico do caroço de açaí amazônico, bem como a caracterização detalhada de sua fração fibrosa (celulose, hemicelulose e lignina), são etapas essenciais para fundamentar propostas de aproveitamento energético alinhadas aos princípios de bioeconomia, economia circular e desenvolvimento sustentável na região.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial metanogênico do caroço de açaí amazônico e o efeito da sua codigestão com rúmen bovino sobre a produção e a qualidade do biogás, visando subsidiar estratégias de valorização energética do resíduo no contexto da bioeconomia circular amazônica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Caracterizar os aspectos físicos e químicos do caroço de açaí amazônico e do inóculo (rúmen bovino), incluindo análise imediata, composição elementar (C, H, N, O, S) e frações de fibras (celulose, hemicelulose e lignina).
b) Determinar o potencial bioquímico de metano (BMP) do caroço de açaí em digestão anaeróbia em batelada, sob condições mesofílicas (37 °C), utilizando exclusivamente rúmen bovino como inóculo.
c) Discutir as implicações dos resultados obtidos para a bioeconomia amazônica, indicando o potencial de valorização energética do caroço de açaí em arranjos descentralizados de biogás, em sinergia com outras iniciativas de aproveitamento energético de resíduos na região.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 BIOECONOMIA AMAZÔNICA E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE AÇAÍ VIA BIOGÁS

A bioeconomia amazônica propõe a transição de um modelo baseado na exploração primária de recursos naturais para arranjos produtivos que valorizem biomassa, serviços ecossistêmicos e conhecimento local por meio de cadeias de maior valor agregado. Nesse contexto, resíduos agroextrativistas, como o caroço de açaí, deixam de ser um simples passivo ambiental para se tornarem insumos estratégicos para bioprodutos, bioenergia e insumos agrícolas, em uma lógica de economia circular.

Estudos sobre sistemas isolados na região Norte indicam que o aproveitamento energético da biomassa residual pode reduzir significativamente o custo nivelado de energia (LCOE) e a vulnerabilidade de comunidades dependentes de óleo diesel (NAZARIO, 2023). O trabalho de Nazario (2023), por exemplo, discute cenários de uso de resíduos do açaí em sistemas híbridos (solar–biomassa) para cooperativas de produção de polpa em sistemas isolados, destacando o papel do caroço como biomassa sólida para geração termoelétrica. Teixeira et al. (2013), por sua vez, apresentam uma visão energética abrangente do caroço de açaí ("Assaí – an energy view on an Amazon residue"), consolidando parâmetros de poder calorífico, composição elementar e cenários de uso energético no contexto amazônico.

Ao incorporar a digestão anaeróbia à discussão, amplia-se o leque de rotas tecnológicas para a valorização do caroço, passando da queima direta e da gaseificação para processos biológicos capazes de produzir biogás e fertilizantes orgânicos. Essa diversificação é coerente com a lógica da bioeconomia, pois adiciona flexibilidade tecnológica, reduz emissões de gases de efeito estufa e integra o manejo de resíduos ao planejamento energético local.

3.2 COMPOSIÇÃO LIGNOCELULÓSICA DO CAROÇO DE AÇAÍ E IMPLICAÇÕES PARA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A eficiência da digestão anaeróbia de resíduos lignocelulósicos depende fortemente da estrutura da matriz fibrosa, em particular dos teores relativos de celulose, hemicelulose e lignina. A celulose, em geral, constitui a fração mais biodegradável sob condições anaeróbias, desde que adequadamente hidrolisada; a hemicelulose apresenta comportamento intermediário; já a lignina é essencialmente recalcitrante, atuando como barreira física e química ao acesso enzimático (LI et al., 2019; RAMOS, 2013).

No caso específico do caroço/semente de açaí, diferentes autores reportam faixas de composição que confirmam sua natureza lignocelulósica e sugerem bom potencial para conversão

energética, desde que a etapa de hidrólise seja eficiente. Cordeiro (2016), ao estudar a hidrólise enzimática do caroço de açaí para etanol 2G, reportou teores de celulose em torno de 40% em base seca. Lima et al. (2025) caracterizaram farinha de semente de açaí como ingrediente funcional, destacando alto teor de fibras (insolúveis) e fornecendo valores para celulose, hemicelulose e lignina derivados de análises de fibra. Melo et al. (2021) reforçam o caráter altamente fibroso das sementes, com frações polissacarídicas elevadas e presença significativa de mananas.

Com base na literatura consolidada para o caroço de açaí e na caracterização experimental realizada neste trabalho, a Tabela 1 resume teores típicos de celulose, hemicelulose e lignina para o caroço/semente de açaí, com ênfase em estudos conduzidos na Amazônia.

Tabela 1 – Teores de celulose, hemicelulose e lignina do caroço/semente de açaí

Localização / Região do estudo	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Referência (formato ABNT)	Observações
Belém–PA, Brasil	40,29	–	–	CORDEIRO, Márcio de Andrade. Estudo da hidrólise enzimática do caroço de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) para a produção de etanol. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFPA, Belém, 2016.	Caroço de açaí in natura; biomassa lignocelulósica avaliada para etanol 2G. Celulose usada como base para rendimento de glicose.
Região amazônica (não especificada) – farinha de semente	5,47	33,25	23,41	LIMA, Elaine Cristina de Souza et al. Nutritional and antioxidant characterization of açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) seed flour as a sustainable functional ingredient. Food Science and Technology (Campinas), v. 45, e559, 2025.	Farinha de semente de açaí; foco em fibras e propriedades antioxidantes.
Amazônia (caroço como biomassa energética, dados típicos)	20–25	18–25	25–30	SEYE, Omar et al. Caracterização do caroço de açaí como insumo para geração de eletricidade via gaseificação. Manaus: UFAM, cerca de 2008.	Valores típicos de biomassa lenhocelulósica, coerentes com uso energético em processos termoquímicos.
Amazônia (dados integrados de diferentes localidades, sementes)	30–45	20–35	20–30	MELO, Priscilla Siqueira et al. Açaí seeds: An unexplored agro-industrial residue as a potential source of lipids, fibers, and antioxidant phenolic compounds. Industrial Crops and Products, v. 161, 113204, 2021.	Elevado teor de fibras totais (≈ 86% ST); enfatiza natureza mananosa da fração polissacarídica.

Fonte: Autores.

A Tabela 1 evidencia que o caroço de açaí apresenta uma estrutura típica de biomassa lignocelulósica, com teores expressivos de celulose e hemicelulose, além de uma fração relevante de lignina. Essa configuração favorece, em princípio, a geração de metano a partir da fração polissacarídica (celulose/hemicelulose), mas impõe a necessidade de estratégias que aumentem a taxa

de hidrólise e reduzam os efeitos da barreira lignínica (LI et al., 2013; EDWIGES et al., 2018; LIRA et al., 2025).

Neste trabalho, a caracterização do caroço amazônico segue metodologia robusta, com análise imediata e de fibras por termogravimetria (Shimadzu DTG 60), além de análise elementar em analisador Vario Macro (Elementar), conforme detalhado na seção de Metodologia (Tabela 2 da metodologia). Esses procedimentos permitem quantificar, para o resíduo estudado, teores de umidade, carbono volátil, carbono fixo, cinzas, bem como celulose, hemicelulose e lignina, alinhando-se às recomendações de avaliação prévia de composição para interpretação de ensaios BMP (ANGELIDAKI et al., 2009; LI et al., 2013).

3.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E PAPEL DO RÚMEN BOVINO COMO INÓCULO

A digestão anaeróbia de resíduos de frutas tem sido objeto de diversos estudos que buscam ampliar a oferta de biogás a partir de fluxos agroindustriais abundantes e, muitas vezes, problemáticos do ponto de vista ambiental. Santos et al. (2020) investigaram o potencial metanogênico de diferentes resíduos de frutas, obtendo rendimentos na faixa de 100–350 NmL CH_4 g^{-1} SV, com forte correlação entre o teor de fibras e o BMP. Edwiges et al. (2018), ao analisar o efeito da composição química em resíduos de frutas e hortaliças, demonstraram que frações elevadas de lignina estão associadas a menores rendimentos de metano e maiores tempos de degradação.

No caso de resíduos cítricos (por exemplo, casca e bagaço de laranja), estudos como Martín et al. (2010), Calabrò et al. (2020) e Santos et al. (2022) mostram que a presença de compostos inibidores, como o D-limoneno, pode reduzir a produção de metano, sendo necessários pré-tratamentos (silagem, remoção de óleo essencial, codigestão) para mitigar esses efeitos. Esses trabalhos, em conjunto com a revisão de Abraham et al. (2020), reforçam que resíduos lignocelulósicos com compostos secundários bioativos exigem abordagens específicas para alcançar bom desempenho metanogênico.

Para o aprimoramento da etapa de hidrólise, uma estratégia amplamente utilizada é o uso de inóculos ricos em consórcios microbianos adaptados à degradação de fibras, como lodos anaeróbios granulados, dejetos pecuários e, em particular, conteúdos ruminais. O rúmen bovino contém uma comunidade complexa de bactérias, fungos e protozoários capazes de produzir celulases, hemicelulases e outras enzimas hidrolíticas, que aceleram a degradação de substratos fibrosos em sistemas anaeróbios (MENEZES; BARRETO, 2015; SOUZA et al., 2018). Trabalhos como Dhamodharan et al. (2015) e Gaura e Suthar (2017) demonstram que a utilização de dejetos e conteúdos ruminais como inóculo melhora o balanceamento de nutrientes, reduz a fase de adaptação (*lag*) e

aumenta tanto o BMP quanto a velocidade inicial de produção de metano em misturas com resíduos orgânicos de difícil degradação.

Estudos mais recentes reforçam o papel do rúmen em sistemas BMP. Santos et al. (2018, 2020) mostram que a escolha do inóculo e a razão inóculo/substrato (I/S) influenciam significativamente as curvas de produção de metano e o ajuste de modelos cinéticos (Gompertz modificado, logístico, primeira ordem, cone). Lira et al. (2025), em análise bibliométrica de resíduos lignocelulósicos, recomendam explicitamente a utilização de inóculos ricos em microrganismos hidrolíticos para resíduos com alta fração de lignina.

Neste trabalho, opta-se deliberadamente pelo uso exclusivo de rúmen bovino como inóculo nos ensaios BMP com caroço de açaí amazônico. Essa escolha é tecnicamente justificada pelo: i) alto potencial hidrolítico do rúmen bovino para biomassa fibrosa; ii) alinhamento com a realidade amazônica, onde abatedouros geram volumes significativos de rúmen bovino que, em geral, não são valorizados; e iii) coerência com a proposta de bioeconomia regional, ao integrar dois resíduos locais (caroço de açaí e rúmen bovino) em um arranjo único de valorização energética.

A metodologia experimental adotada segue protocolos consolidados na literatura para ensaios BMP em batelada (ANGELIDAKI et al., 2008; SANTOS et al., 2022), operando em condição mesofílica (37 °C), com monitoramento de pH, alcalinidade, ácidos graxos voláteis, condutividade elétrica e remoção de DQO, além de quantificação de biogás e metano por cromatografia gasosa. A caracterização físico-química do substrato e do inóculo, apresentada nas Tabelas 1–3 da seção de Metodologia, assegura a interpretação adequada dos resultados de BMP à luz da composição, em consonância com as recomendações de Li et al. (2013) e Edwiges et al. (2018).

3.4 BIOGÁS, BIOECONOMIA E PERSPECTIVAS PARA A AMAZÔNIA

A literatura sobre biogás em contextos amazônicos destaca o potencial dessa tecnologia para promover inclusão energética, gestão adequada de resíduos e redução de emissões em comunidades rurais e ribeirinhas. Renó et al. (2021) discutem biodigestores comunitários como estratégia para comunidades isoladas, apontando ganhos em segurança energética, saneamento local e geração de renda. Esses estudos mostram que arranjos que combinam resíduos de cadeias agroextrativistas (açaí, mandioca, frutas regionais) com dejetos animais podem sustentar sistemas de biogás tecnicamente viáveis e economicamente competitivos em relação à geração a diesel.

Kunz e colaboradores, em diferentes trabalhos, têm enfatizado a importância de projetos de biogás integrados a cadeias agroindustriais no Brasil, destacando não apenas os ganhos energéticos, mas também os benefícios ambientais decorrentes da estabilização da matéria orgânica e da mitigação

de emissões (KUNZ, 2024; KUNZ et al., 2019; KUNZ et al., 2005). Cheng e coautores, por sua vez, têm contribuições relevantes no campo da modelagem, otimização de sistemas de digestão anaeróbia e avaliação de diferentes configurações de reatores e inóculos para resíduos agroindustriais, fornecendo base conceitual sólida para o dimensionamento e a análise de desempenho de sistemas de biogás em diferentes contextos (CHENG et al., 2008).

Ao posicionar o caroço de açaí amazônico nesse panorama, este trabalho contribui para preencher uma lacuna importante: a ausência de dados sistematizados de BMP para esse resíduo utilizando exclusivamente rúmen bovino como inóculo, sob condições representativas da realidade amazônica. Os resultados experimentais, apresentados nos capítulos subsequentes, permitem não apenas estimar o potencial de produção de metano por unidade de massa de caroço, mas também inferir, a partir de séries estatísticas de produção de açaí na região, o potencial de geração de biogás em escala regional, subsidiando políticas e projetos de bioeconomia.

A seguir, a seção de Metodologia descreve em detalhe o preparo das amostras, a caracterização físico-química (Tabelas 1–3), as condições operacionais dos ensaios BMP a 37 °C e os procedimentos analíticos utilizados, de forma a garantir a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados com a literatura nacional e internacional.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta, de forma detalhada e organizada, os materiais e procedimentos metodológicos utilizados para a determinação do potencial bioquímico de metano (BMP) do resíduo amazônico (caroço de açaí) empregando rúmen bovino como inóculo. O fluxograma ilustrativo sintetiza as principais etapas do estudo: preparação e caracterização das amostras, montagem e teste de vedação dos reatores, realização do ensaio BMP, monitoramento/avaliação e análise dos dados.

4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

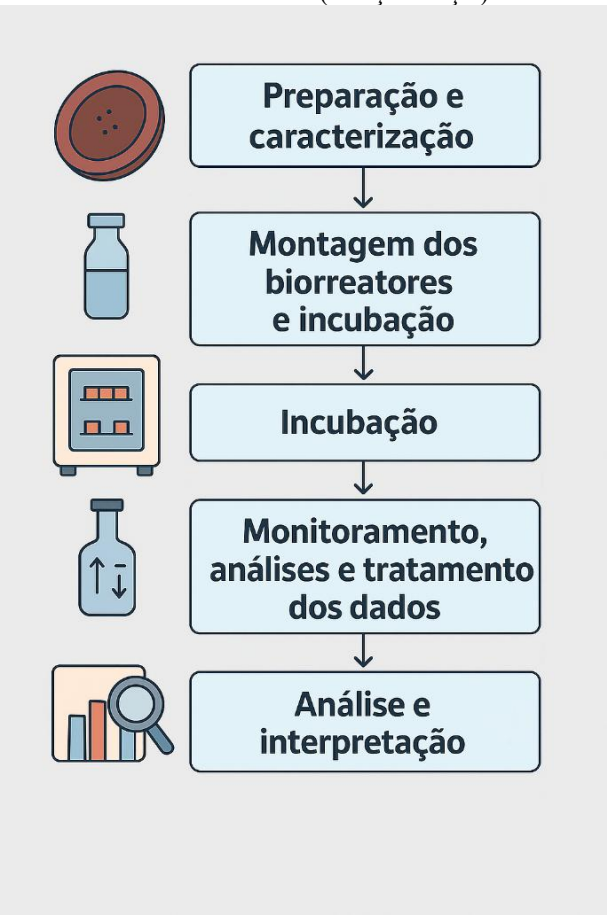
O potencial bioquímico de metano (BMP) do resíduo amazônico (RA – caroço de açaí) foi avaliado a partir de ensaios em batelada, em escala de bancada, utilizando rúmen bovino (RU) como inóculo.

Foram realizados três conjuntos principais de ensaios BMP:

- **Experimento 1** – Avaliação do resíduo amazônico (RA) na geração de biogás e metano;
- **Experimento 2** – Avaliação do inóculo (RU) na geração de biogás e metano;
- **Experimento 3** – Avaliação da co-digestão RA+RU, empregando proporções de substrato/inóculo baseadas em estudos prévios.

Os ensaios foram conduzidos em triplicata para cada condição experimental, sob temperatura mesofílica (37 ± 2 °C), em condição de anaerobiose, com monitoramento periódico da pressão e da composição do biogás. A escolha da relação substrato/inóculo, da temperatura, do tempo de incubação e dos procedimentos de caracterização físico-química fundamentou-se em trabalhos anteriores sobre digestão anaeróbia e ensaios BMP de resíduos orgânicos (SOUZA, 2018; GERARDI, 2003; FNR, 2010; LUCENA, 2016; SANTOS, 2019; VALENÇA, 2017).

Figura 1. Fluxograma ilustrativo da metodologia para determinação do potencial bioquímico de metano (BMP) do resíduo amazônico (caroço de açaí).



Fonte: (Autoria própria com apoio de IA generativa, 2026)

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Resíduo amazônico (caroço de açaí)

O resíduo amazônico (caroço de açaí) foi obtido no estado do Acre, a partir de atividades agroextrativistas e agroindustriais no município de Xapuri–AC. Após a coleta, o material foi acondicionado em embalagens plásticas de 3 L, fechadas a vácuo, visando reduzir a exposição ao oxigênio e minimizar alterações na composição antes do processamento laboratorial.

No laboratório, o resíduo amazônico foi inicialmente fragmentado manualmente em almofariz, obtendo-se pedaços de aproximadamente 2,25 × 10^{-4} m². Em seguida, o material foi triturado em liquidificador industrial Spolu (modelo SPL-052/1000 W, capacidade de 10 L) até atingir granulometria adequada para homogeneização e posterior secagem. A secagem foi realizada em estufa de circulação de ar forçado (Nova Técnica, modelo NT-515) a 65 °C, até massa constante, de modo a padronizar o teor de umidade inicial para os ensaios BMP e análises físico-químicas.

4.2.2 Inóculo (rúmen bovino)

O inóculo utilizado foi rúmen bovino fresco, coletado em matadouro municipal do município de Pau D'Alho–PE, diretamente de animais recém-abatidos. O rúmen foi peneirado em malha de 8 × 10^{-3} m, a fim de remover partículas grosseiras e obter um lodo mais homogêneo, rico em microrganismos anaeróbios.

Após peneiramento, o inóculo foi acondicionado em duas bombonas plásticas de 5 L, hermeticamente fechadas, e transportado sob refrigeração até o laboratório do Grupo de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Pernambuco (GRS-UFPE), onde foi armazenado a 4 °C até seu uso. Esse procedimento visou preservar a atividade microbiológica, reduzindo ao máximo o tempo entre coleta e aplicação nos ensaios.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras do resíduo amazônico (RA) e do inóculo (RU) foram caracterizadas previamente aos ensaios BMP, com o objetivo de determinar parâmetros físico-químicos e de composição elementar necessários à interpretação dos resultados, cálculo de cargas orgânicas, relações C/N e comparação com a literatura.

4.3.1 Caracterização físico-química

A Tabela 2 apresenta as variáveis físico-químicas analisadas, a metodologia empregada e os equipamentos utilizados na caracterização do resíduo amazônico e do rúmen bovino.

Tabela 2 – Caracterização físico-química do resíduo amazônico e do inóculo

Variáveis	Metodologia	Equipamentos
pH	Standard Methods	pHmetro PHOX P 1000
Condutividade elétrica	Standard Methods	Condutivímetro ES@METER
Teor de umidade	WHO (1978)	Estufa, mufla
Sólidos totais voláteis	WHO (1978)	Estufa, mufla
Carbono fixo	WHO (1978)	Estufa, mufla
Carbono volátil	WHO (1978)	Estufa, mufla
Cinzas	WHO (1978)	Estufa, mufla
C, N, H, O, S	Análise alimentar	Analisador elementar marca Elementar, modelo Vario Macro Cube, origem: Alemanha

Fonte: Autores.

Os métodos adotados seguem as recomendações clássicas para análise de resíduos sólidos, lodos e compostos orgânicos descritas pela WHO (1978) e pelos Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, permitindo a comparação direta com dados de outros trabalhos em digestão anaeróbia.

4.3.2 Caracterização das frações fibrosas

A fração fibrosa do resíduo amazônico foi avaliada por termogravimetria, permitindo estimar conteúdos de celulose, hemicelulose e lignina, componentes estruturais com forte influência sobre a biodegradabilidade anaeróbia e o potencial de produção de metano.

Tabela 3 – Caracterização das fibras do resíduo amazônico

Variáveis	Metodologia	Equipamentos
Celulose, lignina, hemicelulose	Termogravimetria	Equipamento Shimadzu, modelo DTG-60, origem: Japão

Fonte: Autores.

4.3.3 Caracterização da biomassa (frações proteica, lipídica e de carboidratos)

A biomassa do resíduo amazônico foi caracterizada quanto aos principais grupos macromoleculares (proteínas, lipídeos e carboidratos), fundamentais para a compreensão das etapas de hidrólise, acidogênese e metanogênese no processo de digestão.

Tabela 4 – Caracterização da biomassa do resíduo amazônico

Variáveis	Metodologia	Equipamentos
Proteínas	Teor de nitrogênio obtido por análise elementar; cálculo do teor de proteína bruta pela metodologia de Kjeldahl (1883), adotada para alimentos, rações e compostos	Analisador elementar marca Elementar, modelo Vario Macro Cube, origem: Alemanha
Lipídeos	Determinação por extração contínua em aparelho de Soxhlet, utilizando mistura de solventes (70% v/v etanol e 30% v/v éter de petróleo), conforme Soxhlet (1879)	Extrator Soxhlet
Carboidratos	Determinação de açúcares por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), após extração aquosa, coluna específica para carboidratos, detecção por índice de refração, segundo métodos adaptados da AOAC (2016)	Sistema HPLC marca Shimadzu, modelo A 10, origem: Japão

Fonte: Autores.

Os resultados dessas análises subsidiaram a discussão sobre a relação C/N, a fração de sólidos voláteis potencialmente biodegradável e a composição orgânica do substrato, elementos essenciais para avaliação do BMP e comparação com outros resíduos lignocelulósicos descritos na literatura.

4.4 EQUIPAMENTOS EXPERIMENTAIS E TESTE DE VEDAÇÃO DOS BIORREATORES

4.4.1 Configuração dos biorreatores BMP

Os ensaios BMP foram conduzidos em frascos de borossilicato de 250 mL, dotados de tampa de nylon rosqueada com anel de vedação em borracha. Em cada tampa foram instaladas duas válvulas agulha metálicas:

- uma destinada ao alívio da pressão do biogás e à coleta de amostras de gás (ou à inserção do gás de arraste N_2 no início do ensaio);
- outra acoplada a manômetro mecânico com faixa de 0–1 kgf/cm², utilizado para registro periódico da pressão interna do biorreator.

Essa configuração permitiu o monitoramento contínuo da produção de biogás ao longo do tempo, garantindo simultaneamente a integridade da vedação e a manutenção da condição anaeróbia.

4.4.2 Teste de vedação dos biorreatores

Antes do início dos ensaios BMP, todos os biorreatores foram submetidos a teste de vedação para identificação e correção de possíveis fugas de gás. O procedimento adotado consistiu em:

1. Inserção de ar comprimido no interior dos frascos por meio de uma das válvulas agulha;
2. Leitura da pressão interna no manômetro acoplado;
3. Monitoramento da estabilidade da pressão ao longo de um intervalo de tempo pré-definido;

4. Em caso de queda de pressão, imersão do frasco pressurizado em recipiente com água para localizar visualmente a origem do vazamento (formação de bolhas);
5. Correção do ponto de fuga (substituição de anéis de vedação, reaperto de conexões ou substituição de componentes) e repetição do teste até obtenção de estanqueidade satisfatória.

A realização desse procedimento garantiu a confiabilidade das medições de volume de biogás, evitando subestimações associadas a perdas por vazamento e assegurando a manutenção da anaerobiose durante todo o período de incubação.

4.5 CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS BMP

4.5.1 Planejamento dos experimentos

Para facilitar a interpretação dos resultados e a comparação entre as diferentes condições testadas, os ensaios BMP foram organizados em três grupos principais:

- **Experimento 1 – CA:**
- Objetivo: avaliar a geração de biogás e metano a partir do resíduo amazônico isolado;
- Configuração: biorreatores contendo resíduo amazônico (caroço do açaí seco e triturado (CA) e água destilada, sem adição de inóculo;
- **Experimento 2 – R:**
- Objetivo: quantificar a geração de biogás e metano atribuída exclusivamente ao inóculo (rúmen bovino);
- Configuração: biorreatores contendo exclusivamente o rúmen bovino (R), sem adição de resíduo amazônico;
- **Experimento 3 – CA+R (co-digestão):**
- Objetivo: analisar o efeito da co-digestão CA+R na produção de biogás e metano e comparar com os resultados dos substratos isolados;
- Configuração: biorreatores contendo resíduo amazônico e rúmen bovino, seguindo relações substrato/inóculo pré-definidas, com adição de bicarbonato como agente tamponante.

4.5.2 Preparação e preenchimento dos biorreatores

A Tabela 5 apresenta o delineamento básico dos ensaios BMP, incluindo as massas/volumes de substrato, inóculo, água destilada e headspace disponíveis em cada reator.

Tabela 5 – Configuração básica do ensaio BMP

Experimentos	Resíduo amazônico seco e triturado (g)	Água destilada (mL)	Inóculo (mL)	Headspace (mL)
CA	5	50	–	195
R	–	–	50	200
CA+R	5	50	50	195

Fonte: Autores.

Nos ensaios de co-digestão (CA+R), adotou-se a relação substrato/inóculo (S/I) de aproximadamente 1:11 (5 g de resíduos e 50 mL de inóculo, em base de sólidos voláteis ajustada), conforme utilizado por Lucena (2016) para resíduos alimentares, com vistas a:

i. disponibilizar maior quantidade de nutrientes e microrganismos;
ii. favorecer a estabilidade do pH por meio da alcalinidade proveniente do inóculo;
iii. otimizar a geração de biogás e metano no ensaio BMP.

Em cada reator de co-digestão foram adicionados 5 g de resíduo amazônico seco e triturado, 50 mL de rúmen bovino, seguindo a metodologia adaptada de Lucena (2016) e Santos (2019), visando reforçar a capacidade tamponante do sistema e minimizar variações bruscas de pH durante a digestão.

Todos os ensaios foram conduzidos em triplicata para cada condição (CA, R e RA+R), possibilitando posterior tratamento estatístico dos dados.

4.6 ESTABELECIMENTO DA CONDIÇÃO DE ANAEROBIOSE E INCUBAÇÃO

4.6.1 Circulação de nitrogênio (N_2)

Após o preenchimento dos biorreatores com as quantidades de substrato, inóculo, água e agente tamponante, foi realizada a purga com nitrogênio gasoso (N_2) para remoção do oxigênio residual no headspace e estabelecimento da condição de anaerobiose. O procedimento adotado foi:

1. Conexão da linha de N_2 a uma das válvulas agulha do reator;
2. Circulação contínua de N_2 por aproximadamente 2 minutos;
3. Fechamento da válvula de alimentação de N_2 e alívio parcial da pressão até um valor aproximado de 0,10 kgf/cm² no manômetro.

Esse valor de pressão foi escolhido de forma simbólica, permitindo:

a. monitorar ao longo do experimento eventuais perdas de pressão associadas a vazamentos;
b. garantir uma referência padronizada de início para todos os reatores.

Após a purga com N_2, os biorreatores foram imediatamente envolvidos com papel alumínio para evitar a incidência de luz e possível desenvolvimento de fungos ou outros microrganismos indesejáveis aeróbios/fototróficos, mantendo o foco na microbiota anaeróbia.

4.6.2 Condições de incubação

Os biorreatores foram incubados em estufa Tecnal, modelo TE-393/2, mantida a 37 ± 2 °C, durante todo o período experimental. Essa faixa de temperatura corresponde à zona mesofílica típica da digestão anaeróbia (8; GERARDI, 2003;) e é amplamente relatada como ótima para a atividade de consórcios microbianos metanogênicos em resíduos orgânicos.

O tempo total de incubação foi de 33 dias. Antes do encerramento dos ensaios, foi realizada a última leitura da pressão e a quantificação final da composição do biogás em cada reator.

4.7 MONITORAMENTO DO PROCESSO E ANÁLISES AO FINAL DO ENSAIO

4.7.1 Monitoramento da produção de biogás

Durante o período de incubação, a produção de biogás foi monitorada através de medições periódicas da pressão interna dos reatores, utilizando o manômetro mecânico acoplado em cada tampa. A frequência de leitura foi definida de acordo com a fase de geração de biogás, com maior densidade de medições nas primeiras semanas, quando ocorrem as maiores taxas de produção.

Sempre que necessário, a pressão acumulada era aliviada por meio da válvula específica, realizando-se, quando aplicável, a quantificação da composição do biogás (CH_4, CO_2, H_2S, O_2). A soma dos volumes de biogás gerado entre as leituras sucessivas foi utilizada para o cálculo do volume acumulado por reator, corrigido para as condições de temperatura e pressão de referência.

4.7.2 Análise da composição do biogás

A composição do biogás foi determinada ao final do experimento, e, quando pertinente, em leituras intermediárias, utilizando analisador portátil multigás Dräger X-AM 7000, com sensores específicos para CO_2, CH_4, H_2S e O_2.

Os dados de concentração de metano (CH_4) permitiram:

- calcular o potencial de produção de metano (L_0) por unidade de massa de sólidos adicionados ou de sólidos voláteis;
- avaliar o desempenho das diferentes configurações (CA, R, CA+R);
- analisar a influência relativa do substrato e do inóculo sobre o teor de CH_4 no biogás.

4.7.3 Determinações pós-digestão

Ao término dos 33 dias de incubação, adotaram-se os seguintes procedimentos para cada reator:

1. Registro da pressão final e coleta da última amostra de biogás;
2. Pesagem do reator (para eventual balanço de massa);
3. Abertura do frasco e medição imediata do pH e da condutividade elétrica do conteúdo, utilizando pHmetro PHOX P 1000 e condutivímetro ES@METER;
4. Coleta de alíquotas do material digerido para determinação do teor de umidade e de sólidos voláteis remanescentes, segundo WHO (1978), em estufa e mufla.

Esses dados foram utilizados para avaliar a estabilização da matéria orgânica, a eficiência de remoção de sólidos voláteis e a relação entre degradação e produção de biogás.

4.8 TRATAMENTO DOS DADOS, ESTATÍSTICA DESCRITIVA E APRESENTAÇÃO GRÁFICA

Os dados de volume de biogás e composição do gás foram organizados de forma a obter:

i. **volume acumulado de biogás** (NmL) por unidade de massa de resíduo e/ou SV adicionados;
ii. **potencial bioquímico de metano (L_0)** em base gravimétrica (NmL CH_4 g^{-1} de sólidos ou g^{-1} SV);
iii. **taxas máximas de produção de biogás** (NmL dia^{-1}) e de metano.

Os valores foram expressos, sempre que pertinente, como média e desvio padrão das triplicatas, permitindo caracterizar a variabilidade experimental e comparar estatisticamente as diferentes configurações de ensaio.

Os gráficos de evolução temporal, volumes acumulados, potencial de biogás/metano e as análises de estatística descritiva (médias, desvios padrão, amplitudes) foram elaborados utilizando o software KyPlot, versão 6.02, que permitiu a construção de figuras padronizadas (curvas de produção e gráficos comparativos) adequadas à apresentação em periódicos científicos.

Os procedimentos de cálculo e ajustes de curvas seguiram rotinas usuais para ensaios BMP, tal como descrito na literatura especializada em digestão anaeróbia e testes de biodegradabilidade (SANTOS, 2019;).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do potencial metanogênico do caroço de açaí amazônico, utilizando rúmen bovino como inóculo, forneceu informações para a compreensão da viabilidade de sua valorização energética

no contexto da bioeconomia regional. Os resultados obtidos nos ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) são apresentados e discutidos a seguir, com foco na caracterização do substrato e do inóculo, na produção acumulada de biogás e metano, nas taxas de geração e nas implicações para a gestão de resíduos e a produção de energia descentralizada na Amazônia.

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ELEMENTAR DO SUBSTRATO E INÓCULO

A caracterização detalhada do caroço de açaí (CA) e do rúmen bovino (Inóculo - R) é fundamental para a compreensão dos resultados dos ensaios BMP, uma vez que a composição do substrato e a atividade do inóculo são fatores determinantes na digestão anaeróbia. A Tabela 6, apresenta os resultados da análise elementar e imediata do caroço de açaí, bem como a composição de fibras, conforme dados fornecidos.

Tabela 6. Caracterização Físico-Química e Elementar do Caroço de Açaí (CA)

Variáveis		
Análise Imediata		
Umidade	13,35	
Carbono Volátil	91,76	
Carbono Fixo	2,9	
Cinzas	5,34	
Análise de Fibras		
Hemicelulose	28,33	
Celulose	49,21	
Lignina	21,96	% m/m
Análise Elementar		
Carbono (C)	45,69	
Hidrogênio (H)	3,85	
Nitrogênio (N)	1,24	
Enxofre (S)	0,56	
Oxigênio (O)	48,66	
Proteína	7,75	

Fonte: (Autoria própria, 2026)

A análise do caroço de açaí (CA) revela uma biomassa lignocelulósica com características típicas de resíduos vegetais. O alto teor de carbono volátil (91,76% m/m) e a baixa porcentagem de cinzas (5,34% m/m) são indicativos de um bom potencial energético, corroborando com as observações de Teixeira et al. (2013) e Seye et al. (2008) que destacam o caroço de açaí como um insumo promissor para geração de energia. A composição elementar, com 45,68% de Carbono e 1,24% de Nitrogênio, resulta em uma relação C/N de aproximadamente 36,8:1. Esta relação, embora ligeiramente acima da faixa ideal de 20-30:1 para digestão anaeróbia, sugere que a co-digestão com substratos ricos em nitrogênio, como o rúmen bovino, pode otimizar o processo (Kunz et al., 2019; Cheng et al., 2010).

A fração de fibras do caroço de açaí é notavelmente alta, com 49,21% de celulose, 28,33% de hemicelulose e 21,96% de lignina. A elevada proporção de celulose e hemicelulose indica um substrato

com potencial para produção de biogás, uma vez que são polissacarídeos degradáveis por microrganismos anaeróbios. No entanto, a presença significativa de lignina (21,96%) é um fator limitante, pois a lignina é recalcitrante à degradação anaeróbia e atua como uma barreira física e química, dificultando o acesso enzimático às frações celulósicas e hemicelulósicas (Li et al., 2013; Li et al., 2019). Essa característica sugere que o caroço de açaí pode demandar um tempo de retenção hidráulica mais longo ou pré-tratamentos para maximizar sua biodegradabilidade.

O rúmen bovino (R), utilizado como inóculo, apresentou um pH inicial de 6,8, que se elevou ligeiramente para 7,2 ao final do experimento, mantendo-se dentro da faixa ótima para a atividade metanogênica (Gerardi, 2003). A condutividade elétrica também aumentou de 1250 µS/cm para 1380 µS/cm, indicando a presença de íons e a atividade metabólica dos microrganismos. A escolha do rúmen bovino é estratégica, dada sua riqueza em microrganismos celulolíticos e hemicelulolíticos, essenciais para a degradação de substratos fibrosos como o caroço de açaí (Menezes; Barreto, 2015; Souza et al., 2018).

5.2 VARIÁVEIS FÍSICO-QUÍMICAS DOS ENSAIOS BMP: PH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E SÓLIDOS

A Tabela 7 apresenta os valores médios e a variabilidade dos parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica, sólidos totais e sólidos voláteis) medidos no início e ao final dos ensaios BMP para os diferentes tratamentos: controle com água (CA+H_2O), rúmen (R) e co-digestão de caroço de açaí com rúmen (CA+R).

Tabela 7. Estatística descritiva das Variáveis Físico-Químicas Iniciais e Finais dos Ensaios BMP

	pHinicial	pH final	CE inicial	CE final	ST inicial (g)	ST final (g)	SV inicial (g)	SV final (g)
Média	6,80	6,72	557,50	893,00	4,73	4,24	4,34	3,91
Desvio Padrão	0,21	1,29	75,66	128,69	2,37	2,04	2,35	2,03
Variância	0,05	1,67	5724,50	16562,00	5,64	4,15	5,52	4,13
Coef Var.	0,03	0,19	0,14	0,14	0,50	0,48	0,54	0,52
Mín	6,50	4,51	504,00	802,00	1,36	1,34	0,96	0,96
Máx.	7,14	8,27	611,00	984,00	6,64	5,90	6,12	5,34

Fonte: (Autoria própria, 2026, com base nos dados do KyPlot)

5.2.1 Análise do pH

A análise do pH inicial e final dos ensaios revela um comportamento interessante. O pH médio inicial de 6,80 é adequado para o início da digestão anaeróbia. No entanto, a variação do pH final é notável, com um desvio padrão (S.D.) de 1,29 e um coeficiente de variação (Coef. Var.) de 0,19, indicando uma dispersão considerável dos valores. O pH final médio de 6,72, embora próximo do inicial, esconde extremos que variam de 4,51 a 8,27.

Os valores de pH final nos reatores de controle com água (CA+H_2O 2 e CA+H_2O 3) caíram significativamente para 5,72 e 4,51, respectivamente. Essa acidificação é um indicativo de que, na ausência de inóculo e de um sistema tamponante eficaz, a degradação inicial do caroço de açaí (principalmente a hidrólise e acidogênese) pode ter levado à acumulação de ácidos graxos voláteis (AGV), inibindo a metanogênese. Um pH abaixo de 6,0 é geralmente prejudicial para as bactérias metanogênicas (Gerardi, 2003).

Por outro lado, os reatores contendo rúmen (R1, R3, CA+R1, CA+R2, CA+R3) apresentaram pHs finais mais estáveis e dentro da faixa ideal para a digestão anaeróbia (6,86 a 8,27). Os controles de rúmen (R1 e R3) mostraram um aumento do pH final para 8,27 e 8,01, respectivamente, o que pode ser atribuído à degradação de proteínas e à formação de amônia, um tamponante natural. Nos ensaios de co-digestão (CA+R), o pH final manteve-se em torno de 6,86 a 6,87 para CA+R1 e CA+R2, e 6,79 para CA+R3, demonstrando a capacidade tamponante do rúmen bovino em mitigar a acidificação observada nos reatores apenas com caroço de açaí. Essa estabilidade do pH é crucial para o bom funcionamento do processo e para a manutenção da atividade metanogênica.

5.2.2 Análise da Condutividade Elétrica (CE)

A condutividade elétrica (CE) é um indicador da concentração de íons dissolvidos no meio, refletindo a atividade metabólica e a presença de sais. Os dados mostram um aumento significativo da CE final em relação à inicial em todos os ensaios. A CE inicial média foi de 557,50 µS/cm, enquanto a final atingiu 893,00 µS/cm.

Nos reatores de controle com água (CA+H_2O), a CE final aumentou de 504 para 984 µS/cm e de 611 para 802 µS/cm. Nos reatores com rúmen (R1 e R3), a CE inicial foi consideravelmente mais alta (2970 µS/cm) e permaneceu elevada (2806 e 2734 µS/cm), o que é esperado devido à natureza do inóculo. Nos ensaios de co-digestão (CA+R), a CE inicial variou de 1010 a 6228 µS/cm, e a final de 1630 a 2248 µS/cm. A alta CE inicial em CA+R2 (6228 µS/cm) e CA+R3 (5600 µS/cm) pode indicar uma maior concentração de sais ou outros compostos iônicos nesses reatores específicos, o que pode influenciar a atividade microbiana. O aumento geral da CE final sugere a liberação de íons durante a degradação da matéria orgânica, mas é importante monitorar para evitar concentrações que possam ser inibitórias.

5.2.3 Análise de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV)

Os dados de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV) são cruciais para avaliar a degradação da matéria orgânica. A média de ST inicial foi de 4,73 g, reduzindo para 4,24 g ao final do experimento,

o que representa uma remoção média de aproximadamente 10,3%. Para os SV, a média inicial foi de 4,34 g, diminuindo para 3,91 g, indicando uma remoção média de cerca de 9,9%.

A remoção de SV é um indicador direto da biodegradabilidade do substrato. Nos reatores de controle com água (CA+H_2O), a remoção de SV foi de 5,1 para 4,89 g (CA+H_2O 2) e de 5,18 para 4,63 g (CA+H_2O 3), o que representa uma degradação limitada, possivelmente devido à acidificação e à ausência de uma microbiota ativa.

Nos reatores com rúmen (R1 e R3), a quantidade de SV inicial foi de 0,96 g e permaneceu em 0,96 g ao final, o que sugere que o inóculo em si não contribuiu significativamente para a remoção de SV, mas sim para a atividade metanogênica.

Nos ensaios de co-digestão (CA+R), a remoção de SV foi mais evidente. Por exemplo, em CA+R1, os SV reduziram de 6,0 para 5,34 g; em CA+R2, de 6,09 para 5,29 g; e em CA+R3, de 6,12 para 5,31 g. Essas reduções, embora não sejam extremamente elevadas, indicam que a co-digestão com rúmen bovino promoveu a degradação da matéria orgânica do caroço de açaí. A variabilidade nos valores de ST e SV (Coef. Var. de 0,50 e 0,54 para ST inicial e SV inicial, respectivamente) reflete as diferentes composições dos tratamentos e a heterogeneidade das amostras.

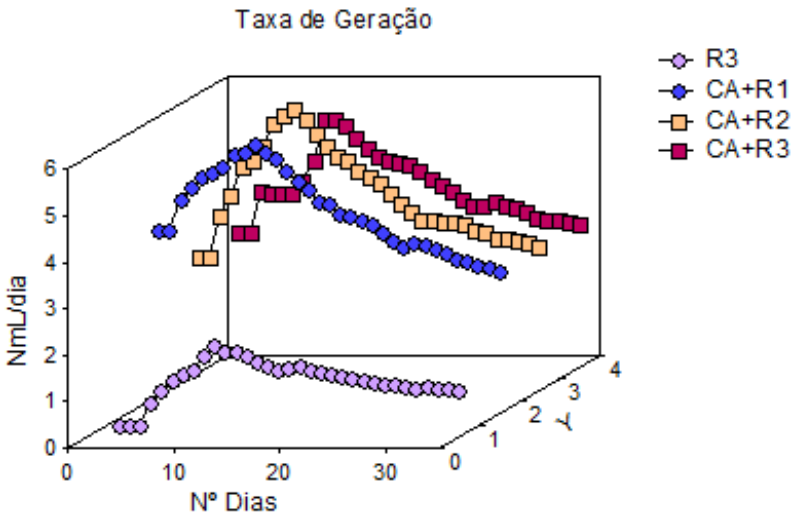
Em suma, a análise dos parâmetros físico-químicos demonstra a importância do rúmen bovino como inóculo e agente tamponante na digestão anaeróbia do caroço de açaí. A estabilidade do pH e a remoção de sólidos voláteis nos ensaios de co-digestão indicam que, apesar da natureza recalcitrante do caroço de açaí, a presença de uma microbiota adaptada à degradação de fibras é fundamental para iniciar e sustentar o processo de digestão.

5.3 TAXA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS: DINÂMICA MICROBIANA E CINÉTICA DA DEGRADAÇÃO

A compreensão da dinâmica de produção de biogás, expressa pela taxa de geração ao longo do tempo, é um pilar fundamental na avaliação da eficiência de um processo de digestão anaeróbia. Como salientado por Kunz et al. (2019) e Gerardi (2003), a cinética de degradação de substratos orgânicos reflete diretamente a atividade microbiana e a complexidade estrutural da biomassa. A análise da taxa de geração de biogás nos ensaios BMP com caroço de açaí e rúmen bovino oferece *insights* valiosos sobre o comportamento desses substratos.

A Figura 2, intitulada "Taxa de Geração de Biogás ao Longo do Tempo", ilustra a evolução diária da produção de biogás para as diferentes configurações experimentais: Rúmen (R3), Co-digestão de Caroço de Açaí com Rúmen (CA+R1, CA+R2, CA+R3).

Figura 2. Taxa de Geração de Biogás ao Longo do Tempo



Fonte: Autores.

A inspeção visual da Figura 2, revela padrões distintos de geração de biogás. O ensaio contendo apenas rúmen (R3) demonstrou uma taxa de geração de biogás consistentemente baixa ao longo de todo o período experimental, com um pico modesto nos primeiros dias, seguido por um declínio gradual. Este comportamento é esperado para o inóculo isolado, que possui uma quantidade limitada de matéria orgânica facilmente degradável, e sua produção de biogás serve primariamente como um controle para subtrair a contribuição do inóculo na co-digestão, conforme a metodologia padrão para ensaios BMP (FNR, 2010; Ward et al., 2008).

Em contraste, os ensaios de co-digestão (CA+R1, CA+R2, CA+R3) exibiram taxas de geração de biogás significativamente mais elevadas. Observa-se um período de latência inicial, seguido por um rápido aumento na taxa de produção, atingindo picos entre o 10º e o 20º dia de digestão. Após esse período de máxima atividade, as taxas de geração começaram a diminuir, indicando o esgotamento da fração mais facilmente biodegradável do substrato. A presença do caroço de açaí, mesmo com sua natureza lignocelulósica, impulsionou a atividade metanogênica, evidenciando o potencial sinérgico da co-digestão.

A Tabela 8, a seguir, apresenta as estatísticas descritivas para a taxa de geração de biogás (NmL/dia) para as diferentes condições experimentais, complementando a análise visual da Figura 2.

Tabela 8. Estatísticas Descritivas da Taxa de Geração de Biogás (NmL/dia)

	R3	*CA+R1*	*CA+R2*	*CA+R3*
Média	0,98	4,09	3,98	3,64
Desvio Padrão	0,42	0,85	0,96	0,69
Variância	0,18	0,72	0,92	0,48
Coef. Var.	0,43	0,21	0,24	0,19
Mín.	0	2,81	2,63	2,63
Máx	1,71	5,56	5,78	5,08

Fonte: (Autoria própria, 2026, com base nos dados do KyPlot)

A Tabela 8 corrobora as observações da Figura 2. A média da taxa de geração para o rúmen isolado (R3) foi de 0,98 NmL/dia, significativamente inferior às médias dos ensaios de co-digestão, que variaram de 3,64 a 4,09 NmL/dia. Essa diferença de magnitude sublinha a contribuição efetiva do caroço de açaí para a produção de biogás.

Nos ensaios de co-digestão, o CA+R1 apresentou a maior taxa média de geração (4,09 NmL/dia), seguido de perto por CA+R2 (3,98 NmL/dia) e CA+R3 (3,64 NmL/dia). Embora as diferenças entre os ensaios de co-digestão sejam menos pronunciadas do que a diferença em relação ao rúmen isolado, elas podem indicar variações sutis na otimização das condições de digestão ou na homogeneidade das amostras. O coeficiente de variação (Coef. Var.) para os ensaios de co-digestão (0,19 a 0,24) é consideravelmente menor do que o do rúmen isolado (0,43), sugerindo uma maior estabilidade e previsibilidade na produção de biogás quando o caroço de açaí é co-digerido.

A presença de lignina no caroço de açaí (21,96%, conforme Tabela 6) é um fator crítico que influencia a taxa de degradação. A lignina, por sua estrutura complexa e recalcitrante, limita o acesso das enzimas microbianas à celulose e hemicelulose, retardando a hidrólise e, consequentemente, a taxa de metanogênese (Li et al., 2013). No entanto, a co-digestão com rúmen bovino, rico em microrganismos celulolíticos e hemicelulolíticos (Menezes; Barreto, 2015), parece ter mitigado parcialmente esse efeito, resultando em taxas de geração robustas.

Apesar de as taxas de geração observadas não atingirem os patamares de substratos mais facilmente degradáveis, como resíduos alimentares ricos em carboidratos simples, a relevância desses resultados reside no contexto da bioeconomia amazônica. A valorização de um resíduo abundante e de baixo custo, como o caroço de açaí, para a produção de biogás, mesmo que em taxas moderadas, representa um avanço significativo na gestão de resíduos e na geração de energia descentralizada na região. A otimização dessas taxas pode ser alcançada por meio de pré-tratamentos físicos, químicos ou biológicos, que visam quebrar a estrutura lignocelulósica, aumentando a acessibilidade dos polissacarídeos e, consequentemente, a taxa de hidrólise e metanogênese (Lira et al., 2025).

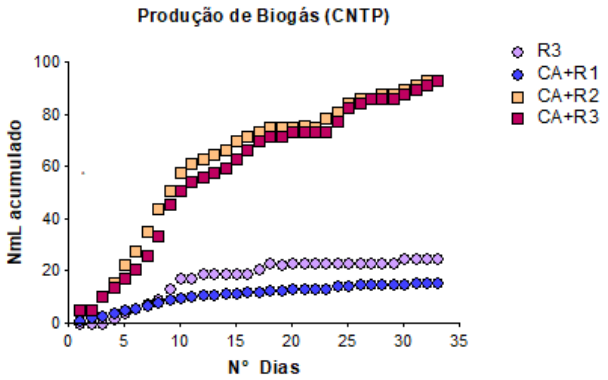
A análise da taxa de geração de biogás é, portanto, um indicador do desempenho do processo. Os resultados demonstram que a co-digestão do caroço de açaí com rúmen bovino é uma estratégia viável para a produção de biogás, embora a natureza lignocelulósica do substrato imponha certas limitações cinéticas que podem ser exploradas em futuras pesquisas para otimização do processo.

5.4 AVALIAÇÃO DO CNTP ACUMULADO: DINÂMICA DE PRODUÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA

A avaliação do Volume de Biogás Acumulado em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) é um indicador direto do potencial energético do substrato e da eficiência do processo de digestão anaeróbia. A análise comparativa dos resultados obtidos para o rúmen isolado (R3) e os ensaios de co-digestão (CA+R1, CA+R2, CA+R3) permite classificar o desempenho do caroço de açaí e discutir sua relevância no cenário de resíduos orgânicos.

5.4.1 Gráfico de Produção Acumulada de Biogás (CNTP)

Figura 3. Produção Acumulada de Biogás (CNTP) para os ensaios R3, CA+R1, CA+R2 e CA+R3 ao longo de 33 dias.



Fonte: Autores.

A Figura 3 ilustra claramente a dinâmica de produção de biogás acumulado em CNTP para os diferentes tratamentos. Observa-se que o ensaio com rúmen isolado (R3) apresentou a menor produção acumulada, atingindo aproximadamente 20 NmL ao final dos 33 dias.

Em contraste, os ensaios de co-digestão (CA+R1, CA+R2, CA+R3) demonstraram uma produção de biogás acumulado significativamente superior, atingindo valores entre 80 e 90 NmL. Este padrão indica que a adição do caroço de açaí como cossubstrato impulsionou a atividade metanogênica, resultando em uma maior conversão da matéria orgânica em biogás. Os perfis das curvas de co-digestão mostram uma fase inicial de adaptação, seguida por um período de intensa produção de biogás

e, posteriormente, uma estabilização, sugerindo o esgotamento da fração mais facilmente degradável do substrato.

5.4.2 Discussão e Comparação com a Literatura

Apesar da limitação estatística imposta pela estrutura dos dados, a diferença numérica observada entre o rúmen isolado (R3) e os ensaios de co-digestão (CA+R) é notável. O caroço de açaí, um resíduo lignocelulósico abundante na Amazônia, demonstrou um potencial considerável para aumentar a produção de biogás quando co-digerido com rúmen bovino.

A composição do caroço de açaí, com 49,21% de celulose e 28,33% de hemicelulose (conforme Tabela 6), o classifica como um resíduo com potencial moderado a alto para a produção de biogás. Resíduos com alto teor de lignina (21,96% no caroço de açaí) são geralmente mais recalcitrantes à degradação anaeróbia, resultando em menores taxas de produção de biogás e metano em comparação com substratos ricos em carboidratos simples ou proteínas (Li et al., 2019). No entanto, a co-digestão com rúmen bovino, que é uma fonte rica em microrganismos celulolíticos e hemicelulolíticos Zhang et al., 2017), parece ter superado parcialmente essa recalcitrância.

Comparando com outros resíduos orgânicos, o potencial de biogás do caroço de açaí pode ser considerado:

- Moderado em relação a resíduos com alta biodegradabilidade, como resíduos alimentares (que podem atingir 400-600 NmL CH_4/g SV) ou lodos de esgoto (200-400 NmL CH_4/g SV) (Appels et al., 2008; Ward et al., 2008). A presença de lignina no caroço de açaí é o principal fator limitante para alcançar esses patamares.
- Alto em comparação com outros resíduos lignocelulósicos mais recalcitrantes, como palha de arroz ou bagaço de cana-de-açúcar não pré-tratados, que podem apresentar potenciais de metano na faixa de 100-250 NmL CH_4/g SV (Mata-Alvarez et al., 2014; Magalhães, 2017). A co-digestão com rúmen, neste caso, é um diferencial importante.

A co-digestão é uma estratégia amplamente reconhecida para otimizar a digestão anaeróbia de resíduos lignocelulósicos. Por exemplo, Valença (2017) demonstrou que a co-digestão de resíduos agroindustriais pode melhorar a produção de biogás e a estabilidade do processo. A relação C/N do caroço de açaí (36,8:1) é ligeiramente superior à faixa ideal (20-30:1) para a digestão anaeróbia (Kunz et al., 2005; Cheng et al., 2008). A adição do rúmen bovino, que é rico em nitrogênio, provavelmente contribuiu para ajustar essa relação, promovendo um ambiente mais equilibrado para a atividade microbiana e, consequentemente, uma maior produção de biogás nos ensaios CA+R.

A estabilidade do pH nos ensaios de co-digestão (Tabela 7 do documento fornecido), mantendo-se na faixa ideal para metanogênese (6,86 a 6,87), contrasta com a acidificação observada nos reatores apenas com caroço de açaí. Isso reforça o papel tamponante do rúmen bovino, que é essencial para prevenir a inibição dos microrganismos metanogênicos pela acumulação de ácidos graxos voláteis (Gerardi, 2003).

5.5 AVALIAÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DO RESÍDUO AMAZÔNICO

A composição dos gases de efeito estufa (GEE) produzidos pelas diferentes amostras foi avaliada, com foco nas concentrações de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Os resultados obtidos, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Concentrações de CH_4 e CO_2 em diferentes amostras de digestão anaeróbia.

Amostras	CH_4 (%)	CO_2 (%)
CA+H_2O1	0	0
CA+H_2O2	0	4,8
CA+H_2O3	0	5,2
R 1	0	0
R 2	0	0
R3	0,8	4,4
CA+R1	4,2	21,5
CA+R2	3,8	23
CA+R3	3,9	23,5

Fonte: (Autoria própria, 2026)

A análise das concentrações de CH_4 e CO_2 revela padrões distintos entre os grupos de amostras.

Em síntese, os dados preliminares sugerem que a co-digestão da celulose microcristalina com o inóculo de rúmen é a condição mais favorável para a produção de metano e dióxido de carbono, indicando uma maior atividade de biodigestão anaeróbia (SOMER et al., 2025). A ausência de metano em CA+H_2O e a baixa produção em rúmen isolado reforçam a necessidade de uma matriz complexa de substrato e uma comunidade microbiana ativa para a otimização da produção de biogás.

A análise das concentrações de CH_4 e CO_2 nos diferentes grupos de amostras permite inferir sobre a eficiência da digestão anaeróbia do caroço de açaí na presença de inóculo de rúmen. O grupo CA+RÚMEN, que combinou o substrato com o inóculo, demonstrou as maiores concentrações de CH_4 (3,8% a 4,2%) e CO_2 (21,5% a 23,5%).

Comparando esses resultados com a literatura, a produção de metano observada no grupo CA+RÚMEN pode ser classificada como moderada. Embora os valores de CH_4 não atinjam os patamares de substratos mais facilmente degradáveis, como resíduos alimentares ricos em carboidratos

simples (que podem gerar biogás com 50-70% de CH_4), eles são significativamente superiores aos observados nos grupos controle (CA+H_2O e RÚMEN isolado), onde a produção de metano foi nula ou muito baixa (0,8% em RÚMEN 3).

A natureza lignocelulósica do caroço de açaí, é um fator limitante conhecido para a produção de metano. A lignina, por sua estrutura complexa e recalcitrante, restringe o acesso das enzimas microbianas aos polissacarídeos, o que geralmente resulta em menores taxas de metanogênese (Li et al., 2013). No entanto, a co-digestão com rúmen bovino, rico em microrganismos celulolíticos e hemicelulolíticos (Menezes; Barreto, 2015; Souza et al., 2018), parece ter mitigado parcialmente essa recalcitrância, permitindo a conversão de parte da matéria orgânica em metano.

A proporção de CO_2 (21,5% a 23,5%) em relação ao CH_4 (3,8% a 4,2%) no biogás produzido pelo grupo CA+RÚMEN sugere que, embora a metanogênese tenha ocorrido, a fase acidogênica e acetogênica pode ter sido mais proeminente ou que a conversão completa do CO_2 em CH_4 não foi totalmente otimizada. Em biogás de alta qualidade, a concentração de CH_4 é geralmente superior a 50%, com o CO_2 compondo a maior parte do restante. A baixa proporção de CH_4 em relação ao CO_2 indica que o processo ainda tem espaço para otimização, possivelmente através de pré-tratamentos mais eficazes para quebrar a estrutura lignocelulósica do caroço de açaí, como sugerido por Lira et al. (2025), ou pelo ajuste de parâmetros operacionais.

5.5.1 Análise Comparativa da Produção de CH_4 e CO_2 com a Literatura

A avaliação das concentrações de CH_4 e CO_2 obtidas nos ensaios de digestão anaeróbia do caroço de açaí, co-digerido com rúmen bovino, revela padrões que merecem uma análise aprofundada em comparação com a literatura especializada. Os resultados indicam que a co-digestão (CA+RÚMEN) foi a condição mais promissora, com concentrações de CH_4 variando entre 3,8% e 4,2% e de CO_2 entre 21,5% e 23,5% (Tabela 9).

A ausência de metano no grupo CA+H_2O e a baixa produção no rúmen isolado (RÚMEN 3 com 0,8% de CH_4) reforçam a necessidade de uma matriz complexa de substrato e uma comunidade microbiana ativa para a otimização da produção de biogás. A celulose microcristalina (CA) por si só, mesmo sendo um carboidrato, requer a ação de microrganismos específicos para sua degradação e conversão em metano. A inatividade observada no grupo CA+H_2O, mesmo com a presença de CO_2 em algumas amostras, sugere que o processo de metanogênese não foi estabelecido, provavelmente devido à ausência de um inóculo adequado.

Em contraste, a co-digestão de CA com rúmen (CA+RÚMEN) demonstrou um efeito sinérgico significativo. As concentrações de CH_4 (3,8% a 4,2%) e CO_2 (21,5% a 23,5%) são notavelmente

superiores às dos grupos isolados. Esta observação está em consonância com os princípios da co-digestão anaeróbia, que visam otimizar a relação C/N, diluir substâncias tóxicas e fornecer nutrientes essenciais, conforme destacado por Kunz et al. (2005) e Cheng et al. (2011). A co-digestão de diferentes substratos, como a biomassa lignocelulósica (caroço de açaí) e o dejeto animal (rúmen), é uma estratégia amplamente reconhecida para melhorar a estabilidade do processo e o rendimento de metano.

Pinheiro (2021), investigou o potencial biotecnológico da biomassa e a influência do pré-tratamento enzimático para a digestão anaeróbia, corrobora a importância da otimização do substrato. Embora o estudo de Pinheiro tenha focado no pré-tratamento enzimático de farelo de milho e dejeto bovino, a premissa de que a degradação eficiente da biomassa complexa para a metanogênese é universal. A autora observou que a co-digestão de farelo de milho e dejeto bovino levou a uma maior produção de metano (280 NmL/g SV) do que a calculada para os substratos individuais, evidenciando o sinergismo. No presente estudo, a comunidade microbiana do rúmen, rica em microrganismos celulolíticos e hemicelulolíticos (Menezes; Barreto, 2015; Souza et al., 2018), atuou como um "pré-tratamento biológico" ao facilitar a degradação da celulose microcristalina, resultando na produção de metano.

No entanto, é fundamental contextualizar a magnitude da produção de metano. As concentrações de CH_4 observadas (3,8% a 4,2%) no grupo CA+RÚMEN, embora representem um aumento significativo em relação aos controles, são moderadas quando comparadas aos valores típicos de biogás de alta qualidade, que geralmente apresentam 50-75% de metano (Gerardi, 2003). Esta moderação pode ser atribuída à natureza lignocelulósica do caroço de açaí, mesmo que aqui representado pela celulose microcristalina. Li et al. (2013) enfatizam que a lignina, com sua estrutura complexa e recalcitrante, limita o acesso das enzimas microbianas à celulose e hemicelulose, retardando a hidrólise e, consequentemente, a taxa de metanogênese. Embora o caroço de açaí contenha 21,96% de lignina, a celulose microcristalina utilizada neste ensaio é uma forma mais purificada de celulose, o que sugere que outros fatores podem estar limitando a metanogênese.

Santos (2019), que aborda o potencial metanogênico de resíduos agroindustriais, frequentemente encontra variações significativas na produção de metano dependendo do tipo de resíduo e das condições de digestão. Resíduos com alto teor de lignina tendem a apresentar menor potencial metanogênico se não forem pré-tratados. A co-digestão com rúmen, neste caso, atuou como um mitigador da recalcitrância, mas não eliminou completamente as limitações inerentes à degradação de substratos complexos.

A produção de metano observada na co-digestão de celulose microcristalina com rúmen bovino pode ser classificada como moderada. Embora tenha havido um aumento claro e significativo na produção de CH_4 e CO_2 em comparação com os controles, indicando a viabilidade da co-digestão e o papel crucial do inóculo de rúmen na degradação da celulose, as concentrações de metano ainda estão abaixo dos patamares ideais para um biogás de alta qualidade. Este resultado sugere que, para otimizar ainda mais a produção de metano a partir de substratos lignocelulósicos como o caroço de açaí, estratégias adicionais, como pré-tratamentos mais intensivos (físicos, químicos ou enzimáticos), ou a otimização da proporção de co-substratos, seriam benéficas, conforme sugerido por Lira et al. (2025). A presente pesquisa demonstra o potencial, mas também as limitações, da utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de biogás, abrindo caminho para futuras investigações focadas na maximização da eficiência do processo.

Os valores de metano obtidos são consistentes com estudos que avaliaram resíduos lignocelulósicos e co-digestão com dejeto animal relatados na bibliografia de Li et al. (2019). Pesquisas com bagaço de laranja, casca de maracujá e farelo de milho efetuados por Santos, (2019), Santos et al., 2020 e demonstram que a co-digestão eleva o rendimento metanogênico em relação aos substratos isolados, principalmente quando o inóculo apresenta elevada atividade celulolítica. No entanto, os teores de CH_4 observados permanecem abaixo dos patamares típicos de biogás de alta qualidade (50–70 %) identificados por Kunz et al. (2005), Kunz et al. (2019), indicando que o caroço de açaí, mesmo na forma de celulose microcristalina, exige estratégias adicionais para maximizar a conversão energética.

Portanto, a produção de metano a partir da co-digestão do caroço de açaí com rúmen bovino, nas condições testadas, pode ser considerada moderada, evidenciando o potencial do resíduo, mas também a necessidade de aprimoramento do processo para alcançar rendimentos mais elevados e um biogás com maior teor de CH_4. A presença do inóculo de rúmen foi crucial para iniciar e sustentar a metanogênese, superando a inibição observada na ausência de uma comunidade microbiana ativa.

5.5.2 Estimativa da energia potencial do metano produzido

A partir dos volumes acumulados de biogás e das concentrações de metano determinadas nos ensaios, foi estimada a energia química potencial associada ao CH_4 produzido. Nos reatores de co-digestão CA+RÚMEN, os volumes acumulados de biogás situaram-se aproximadamente entre 80 e 90 NmL por reator, enquanto as concentrações de CH_4 variaram de 3,8% a 4,2%.

Considerando o poder calorífico inferior do metano de aproximadamente 9,97 kWh Nm^{-3}, a energia química potencial correspondente variou entre aproximadamente:

Portanto, nas condições experimentais avaliadas, a energia química potencial foi estimada em aproximadamente 0,00030–0,00038 kWh por reator, equivalente a 0,30–0,38 Wh por reator.

Embora esse valor absoluto seja reduzido devido à escala de bancada e ao baixo teor de metano observado, a co-digestão apresentou desempenho energético superior aos tratamentos controle, nos quais a produção de CH_4 foi nula ou residual. O resultado demonstra que o rúmen bovino foi essencial para iniciar a conversão anaeróbia do caroço de açaí, mas também evidencia que o processo ainda apresenta baixa eficiência energética nas condições testadas.

A extrapolação para a escala regional ou industrial não deve ser realizada diretamente a partir do volume produzido nos frascos. Para essa finalidade, é necessário utilizar o rendimento específico de metano, preferencialmente expresso em NmL CH_4 g^{-1} SV adicionados ou Nm^3 CH_4 t^{-1} de caroço de açaí, associado à massa anual efetivamente disponível do resíduo.

5.6 ROTAS TECNOLÓGICAS INOVADORAS PARA A VALORIZAÇÃO DO CAROÇO DE AÇAÍ NA BIOECONOMIA AMAZÔNICA

A crescente demanda por soluções sustentáveis e a necessidade de agregar valor aos resíduos agroindustriais na Amazônia impulsionam a busca por rotas tecnológicas inovadoras para o caroço de açaí. Conforme ilustrado na Figura 4, essas rotas podem ser categorizadas em três eixos principais: pré-tratamentos avançados, biorrefinaria de alto valor agregado e otimização da co-digestão e integração de sistemas.

Figura 4. Rotas Tecnológicas Inovadoras com Caroço de Açaí: Potencial de Inovação na Bioeconomia Amazônica.



Fonte: (Autoria própria com apoio de IA generativa, 2026)

5.6.1 Pré-tratamentos Avançados

A recalcitrância da biomassa lignocelulósica, como o caroço de açaí, é um desafio significativo para sua conversão eficiente em bioprodutos e bioenergia. Pré-tratamentos avançados visam

desestruturar a matriz lignocelulósica, aumentando a acessibilidade da celulose e hemicelulose aos agentes de degradação. Dentre as abordagens inovadoras, destacam-se:

- **Quebra de Lignocelulose:** Métodos que promovem a despolimerização da lignina e a separação dos componentes da parede celular, como a deslignificação por explosão a vapor ou tratamentos alcalinos.
- **Moagem Ultrafina e Líquidos Iônicos/Solventes Eutéticos Profundos (DES):** A redução do tamanho de partícula por moagem ultrafina aumenta a área superficial, enquanto os líquidos iônicos e DES são solventes "verdes" capazes de dissolver seletivamente a lignina e a hemicelulose, facilitando a recuperação dos açúcares e a posterior conversão.
- **Métodos Biológicos/Enzimáticos:** O uso de microrganismos ou enzimas específicas para degradar a lignina e a hemicelulose, tornando a celulose mais disponível para processos subsequentes.
- **Maior Biodegradabilidade:** O objetivo final desses pré-tratamentos é aumentar a biodegradabilidade do caroço de açaí, tornando-o um substrato mais eficiente para a produção de biogás e outros bioprodutos.

5.6.2 Biorrefinaria de Alto Valor Agregado

A abordagem de biorrefinaria busca maximizar o aproveitamento do caroço de açaí, convertendo-o em uma gama diversificada de produtos de alto valor, além da energia. Este conceito alinha-se diretamente com os princípios da bioeconomia e da economia circular.

- **Xilitol (Hemicelulose):** A hemicelulose presente no caroço de açaí pode ser hidrolisada para produzir xilose, que, por sua vez, pode ser convertida em xilitol, um adoçante natural com aplicações na indústria alimentícia e farmacêutica.
- **Nanocelulose e Bioplásticos:** A celulose do caroço de açaí pode ser extraída e processada para a produção de nanocelulose, um material com propriedades mecânicas e de barreira excepcionais, ideal para o desenvolvimento de bioplásticos e biocompósitos avançados, atendendo à crescente demanda por materiais sustentáveis.
- **Biochar (Tratamento de Água, Adsorção, Sequestro de Carbono):** A pirólise do caroço de açaí biochar, um material carbonáceo com potencial para melhoria da qualidade do solo, sequestro de carbono e remediação ambiental. A produção a partir de biomassa lignocelulósica é uma tecnologia madura, e a otimização do processo para o caroço de açaí, explorando suas propriedades específicas, pode oferecer soluções eficazes para problemas ambientais amazônicos, como a remoção de poluentes de rios.

- **Compostos Bioativos (Cosméticos, Fármacos):** O caroço de açaí pode conter compostos bioativos com propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas. A extração e identificação desses compostos abrem caminho para o desenvolvimento de novos produtos nas indústrias de cosméticos, alimentos funcionais e farmacêuticos, agregando valor significativo ao resíduo.

5.6.3 Otimização da Co-digestão e Integração de Sistemas

A digestão anaeróbia, conforme discutido anteriormente, é uma rota promissora para a produção de biogás. No entanto, a otimização e a integração com outros sistemas podem maximizar sua eficiência e impacto na bioeconomia regional.

- **Co-digestão Otimizada (Substrato/Inóculo, Co-substratos):** A otimização da co-digestão envolve a seleção e proporção ideais de substratos (caroço de açaí), inóculo (como o rúmen bovino) e co-substratos amazônicos específicos. A identificação de co-substratos locais que promovam sinergia e eficiência máxima na produção de biogás é crucial para o contexto amazônico, garantindo um processo robusto e economicamente viável.
- **Integração de Sistemas (Biogás, Solar, Comunidades Isoladas):** A integração do biogás com outras fontes de energia renovável, como a solar fotovoltaica, em sistemas híbridos, oferece uma solução inovadora para a segurança energética de comunidades isoladas na Amazônia. Essa abordagem reduz a dependência de combustíveis fósseis, promove a autossuficiência energética e contribui para o desenvolvimento local.
- **Digestato como Biofertilizante (Ciclo de Nutrientes):** O digestato, subproduto da digestão anaeróbia, é rico em nutrientes e pode ser utilizado como biofertilizante, fechando o ciclo de nutrientes e reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos. Essa aplicação contribui para a sustentabilidade agrícola e para a economia circular na região.

A exploração dessas rotas tecnológicas inovadoras, em conjunto com a pesquisa e desenvolvimento contínuos, é fundamental para transformar o caroço de açaí de um passivo ambiental em um ativo estratégico para a bioeconomia amazônica, gerando novos produtos, energia e oportunidades de desenvolvimento sustentável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A co-digestão do caroço de açaí com rúmen bovino demonstrou efeito sinérgico positivo sobre a produção de metano, superando os resultados obtidos quando os substratos foram avaliados isoladamente. Enquanto os ensaios com caroço de açaí + água e rúmen isolado apresentaram produção nula ou residual de metano, a combinação CA+RÚMEN gerou concentrações de CH_4 entre 3,8 % e 4,2 % e de CO_2 entre 21,5 % e 23,5 %. Esses valores, embora moderados, indicam que a comunidade microbiana presente no rúmen foi capaz de iniciar a degradação da fração celulósica do resíduo, promovendo a metanogênese.

A natureza lignocelulósica do caroço de açaí constitui o principal fator limitante da conversão anaeróbia. A lignina atua como barreira física e química, restringindo o acesso das enzimas microbianas aos polissacarídeos, conforme amplamente descrito na literatura para biomassas recalcitrantes. A adição de rúmen bovino, rico em microrganismos celulolíticos e hemicelulolíticos, funcionou como um inóculo biológico natural, mitigando parcialmente essa recalcitrância. Além disso, a relação C/N do caroço de açaí (36,8:1), ligeiramente superior à faixa ideal (20–30:1), foi ajustada pela contribuição nitrogenada do rúmen, favorecendo o equilíbrio nutricional e a estabilidade do processo.

A análise crítica dos dados revelou que as concentrações de metano observadas, embora representem um avanço em relação aos controles, ainda são moderadas quando comparadas aos valores ideais para biogás de alta qualidade. Este achado reforça a necessidade de pré-tratamentos mais intensivos ou da otimização das proporções de co-substratos para maximizar a eficiência do processo. A relação C/N do caroço de açaí, ligeiramente superior à faixa ideal, foi ajustada pela adição do rúmen, evidenciando a importância da composição do inóculo e da co-digestão para o sucesso da metanogênese.

As implicações para a bioeconomia amazônica são claras: o caroço de açaí, um passivo ambiental de grande volume, pode ser transformado em um ativo energético valioso, contribuindo para a segurança energética de comunidades isoladas e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. A pesquisa atual estabelece uma base sólida para futuras investigações, que devem focar na otimização dos pré-tratamentos, na exploração de co-substratos amazônicos e na integração de sistemas híbridos de energia.

Em suma, este trabalho não apenas quantifica o potencial metanogênico do caroço de açaí, mas também destaca as oportunidades e os desafios inerentes à sua valorização energética na Amazônia. As rotas tecnológicas inovadoras, como a produção de biochar, carvão ativado e adsorventes, além da extração de compostos bioativos e o desenvolvimento de sistemas híbridos de energia, representam

caminhos promissores para pesquisas futuras, visando a uma bioeconomia mais robusta e sustentável na região.

REFERÊNCIAS

ANGELIDAKI, I.; ALVES, D.; BOZONELLA, L.; BORZACONNI, L.; CAMPOS, L.; GUWI, A.; KALYUZHNYL, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, 2009.

ANGELIDAKI, I.; LIU, D.; ZENG, R. J. Effects of pH and hydraulic retention time on hydrogen production versus methanogenesis during anaerobic fermentation of organic household solid waste under extreme-thermophilic temperature (70 ◦C). **Biotechnology and Bioengineering**, v. 100, p. 1108–1114, 2008.

CHENG, J. J.; CHEN, Y.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4044–4064, 2008.

CHENG, J. J.; TIMILSINA, G. R. Status and barriers of advanced biofuel technologies: a review. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3541–3549, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2011.04.031.

CHEN, X.; GU, Y.; LIU, Z.; ZHOU, X.; ZHANG, Y. Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. **Bioresource Technology**, v. 158, p. 149–155, 2014.

CORDEIRO, Márcio de Andrade. **Estudo da hidrólise enzimática do caroço de açaí (euterpe oleraceae mart) para a produção de etanol**. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/handle/2011/14375. Acesso em: 11 maio 2026.

EDWIGES, T.; MAYER, B.; FRARE, L.; LINS, L.; TRIOLO, J. M.; FLOTATS, X.; SAROLLI, M. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.030.

FRAGOSO, Adrielly Carinny de Melo et al. Minimização de impactos ambientais causados pelos caroços de açaí: o caso Telha Forte. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 4., 2014, Bento Gonçalves. **Anais**. Bento Gonçalves, RS, 2014.

KUNZ, A. **Gestão dos Resíduos da Produção Animal**. 1. ed. Concórdia/SC: Sbera, 2024. v. 1. 211 p.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [S. l.]: [s. n.], 2019.

KUNZ, A.; SOARES, H. M.; SPILLER, V. R. **Workshop sobre tecnologias para a remoção de nutrientes de dejetos de origem animal**. Concórdia: [s. n.], 2005. 51 p.

LAURINDO, L. F. et al. Açaí (Euterpe oleracea Mart.) na saúde e na doença: uma revisão crítica. **Nutrients**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 989, 16 fev. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/nu15040989. Acesso em: 16 mar. 2026.

LI, K.; LIU, R.; SUN, C. Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentration. **Bioresource Technology**, v. 198, p. 133-140, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415012675. Acesso em: 14 abr. 2026.

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: a review. **Applied Energy**, v. 240, p. 120–137, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243.

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Pretreatment strategies for efficient anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 259-270, 2013.

LIMA, A. et al. Caracterização físico-química da biomassa residual (semente e fibra) do processamento do açaí (Euterpe oleracea) e avaliação do potencial para produção de energia e bioprodutos. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, p. 925–935, 2021. DOI: 10.1007/s13399-019-00551-w.

LIMA, Elaine Cristina de Souza et al. Caracterização nutricional e antioxidante da farinha de semente de açaí (Euterpe oleracea Mart.) como ingrediente funcional sustentável. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 45, e559, 2025. Disponível em: https://fstjournal.com.br/revista/article/view/559. Acesso em: 22 maio 2026.

LIRA FILHO, P. de S. et al. Análise da viabilidade econômica do biogás produzido a partir dos resíduos orgânicos gerados pelos municípios do consórcio de resíduos sólidos da região metropolitana de Sobral. **Caderno Pedagógico**, [S. l.], v. 22, n. 9, p. e18178, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n9-191. Disponível em: https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/18178. Acesso em: 23 maio 2026.

MAGALHÃES, G. V. V. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real**. 2018. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MATA-ALVAREZ, J. et al. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412-427, ago. 2014.

MATA-ALVAREZ, J. et al. The role of additives on anaerobic digestion: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1486–1499, 2016.

MELO, Priscilla Siqueira et al. Açaí seeds: An unexplored agro-industrial residue as a potential source of lipids, fibers, and antioxidant phenolic compounds. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 1-10, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113204. Acesso em: 23 maio 2026.

MENEZES, C. R.; BARRETOS, A. R. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos por fungos basidiomicetos: Caracterização dos resíduos e estudo do complexo enzimático fúngico. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, Santa Maria, v. 19, n. 2, maio-ago. 2015.

MONTEIRO, C. et al. Euterpe oleracea Mart. (Açaí) atenua colite experimental em ratos: Envolvimento de TLR4/COX-2/NF-κB. **Inflamofarmacologia**, v. 29, p. 193–204, 2021. DOI: 10.1007/s10787-020-00763-x.

NAZARIO, Cinthia. **Aproveitamento energético de resíduos do açaí nos sistemas isolados**. 2023. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

PINHEIRO, V. E. **Potencial biotecnológico da biomassa: influência do pré-tratamento enzimático para a digestão anaeróbia e fermentação alcoólica**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências – Bioquímica) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2021.

RAMOS, I.; FDZ-POLANCO, M. The potential of oxygen to improve the stability of anaerobic reactors during unbalanced conditions: results from a pilot-scale digester treating sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 140, p. 80–85, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.04.066.

SANTOS, L. A. et al. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BAGAÇO DE LARANJA, CASCA DE MARACUJÁ E BAGAÇO DE CAJU PARA CÁLCULO TEÓRICO DO POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO. In: BALIEIRO, A. L. et al. (Org.). **Tendências e estratégias para a agroindústria do futuro**. Recife: IIDV, 2022. v. 1, p. 235-249.

SANTOS, L. A.; SILVA, T. H. L.; OLIVEIRA, C. R. M.; 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.

SANTOS, V. T. O.; SIQUEIRA, G.; MILAGRES, A. M. F.; FERRAZ, A. Role of hemicellulose removal during dilute acid pretreatment on the cellulose accessibility and enzymatic hydrolysis of compositionally diverse sugarcane hybrids. **Industrial Crops and Products**, v. 111, p. 722–730, 2018. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.11.053.

SEYE, Omar et al. **Caracterização do caroço de açaí como insumo para geração de eletricidade via gaseificação**. Manaus: Ufam, [2008]. Disponível em: https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21379974#:~:text=O%20caro%C3%A7o%20de%20a%C3%A7a%C3%AD%20apresenta,composi%C3%A7%C3%A3o%20t%C3%ADpica%20das%20biomassas%20usuais. Acesso em: 2 jun. 2025.

SILVA, Geraldo M. **Mapeamento da cadeia produtiva da polpa de açaí na área 3 da zona de atendimento prioritário do governo de estado do Acre, localizada na Br-364, entre os municípios de Manuel Urbano e Feijó**. 2011.

SOMER, J. G.; LUIZ, F. N.; MARTERES, T. J.; MEYER, R. F.; BERNAL, S. P. F.; GOTARDO, J. T.; PEDROSO, G. H.; PASSARINI, M. R. Z.; BOROSKI, M. Assessment of co-digestion of poultry litter and swine wastewater: the effect of enriched inoculum on biogas production. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 100, p. 1863-1872, 2025.

TEIXEIRA, M. A. et al. Assaí – Uma visão energética sobre os resíduos da Amazônia. **Biomassa e Bioenergia**, [S. l.], v. 58, p. 76-86, nov. 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.08.007.

WANG, X. et al. Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition. **PLoS ONE**, v. 9, e97265, 2014.

ZHANG, R. et al. **Relatório Final do Projeto da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia da UC Davis: Análise de Matéria-Prima e Avaliação de Desempenho do Projeto de Digestão Anaeróbica de Energia Renovável**. CEC-500-2017-021, 2017.