



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

CARMÉLIA SUYANE DUARTE ALVES LEITÃO

**EFEITO DO NUTRIENTE E ALCALINIZANTE NA PRODUÇÃO DE METANO A
PARTIR DA FRAÇÃO LÍQUIDA DO RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS EM UM
E DOIS ESTÁGIOS**

Fortaleza - CE

2025

CARMÉLIA SUYANE DUARTE ALVES LEITÃO

EFEITO DO NUTRIENTE E ALCALINIZANTE NA PRODUÇÃO DE METANO A
PARTIR DA FRAÇÃO LÍQUIDA DO RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS EM UM E
DOIS ESTÁGIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Ciências do Mar, da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Michael Barbosa Viana
Coorientadora: Dra. Camila Aparecida de
Menezes

Fortaleza - CE

2025

CARMÉLIA SUYANE DUARTE ALVES LEITÃO

EFEITO DO NUTRIENTE E ALCALINIZANTE NA PRODUÇÃO DE METANO A
PARTIR DA FRAÇÃO LÍQUIDA DO RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS EM UM E
DOIS ESTÁGIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Ciências do Mar, da Universidade
Federal do Ceará, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Ciências Ambientais.

Aprovada em: 28/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Michael Barbosa Viana (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Camila Aparecida de Menezes
EMBRAPA - Agroindústria Tropical

Me. Daniel Rodrigues dos Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Priscilla de Souza Almeida
EMBRAPA - Agroindústria Tropical

*Ao sol da minha vida, Inaiã, por iluminar
minha jornada com amor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por proteger meus caminhos.

Aos meus pais e minhas irmãs, por todo apoio e por serem minha rede de apoio. Sem vocês, eu não teria conseguido.

Ao meu filho, Inaiã, meu sol.

Ao Vitor, por todo apoio e ajuda nos momentos em que foi necessário.

À Karine, Iasmyn e Reydson, por todos os anos de amizade e companheirismo.

Aos meus amigos de turma, em especial à Iorrana, ao Maxwell e à Vivian.

A todas as amizades que construí no Labomar, obrigada por todos os momentos no dia a dia, risadas, rolês, apoio e incentivo, com destaque para Ingrid, Lorena, Arianne, Renato e Enzo.

Ao Beto, por todo auxílio e, principalmente, pelos momentos de chatice e silêncio.

Aos funcionários do Labomar, principalmente à Natália, por todas as conversas.

Ao Prof. Michael, pela oportunidade de conhecer a EMBRAPA e pela orientação.

A Dra. Camila, por toda a paciência, auxílio, ensinamentos, orientação e cuidado.

Ao Dr. Renato, pela oportunidade na EMBRAPA.

À EMBRAPA, em especial ao Laboratório de Tecnologia da Biomassa (LTB), onde toda a pesquisa foi desenvolvida.

A minha “família” do LTB, Maíra, Priscilla, Daniel, Camila, Matheus, Carol, Jessica e Pedro por todos os momentos e por todas as tardes: sejam elas na copa, na Noélia comendo zebrinha ou pudim, ou no shopping. E aos que já não estão mais lá, mas que contribuíram de alguma forma: Chagas, Ulisses e Thobias.

A todos do LTB, em especial Men de Sá, Adriano, Alex e à Dona Socorro.

Ao CNPq pelo apoio financeiro com a bolsa de iniciação tecnológica.

Meus sinceros agradecimentos.

“No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.”

Fernando Sabino

RESUMO

O aumento populacional e a expansão das zonas urbanas têm ampliado consideravelmente a demanda por energia, exigindo soluções sustentáveis que conciliem eficiência energética e preservação ambiental. Paralelamente, a geração de grandes volumes de resíduos orgânicos, especialmente em centros de distribuição como as Centrais de Abastecimento (CEASA), representa um desafio para a gestão de resíduos sólidos urbanos. No Ceará, a unidade da CEASA em Maracanaú descarta, diariamente, em média, 13,7 toneladas de resíduos de frutas e verduras (RFV), os quais, devido à sua alta carga orgânica, apresentam potencial para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia (DA). Esse processo biológico, realizado na ausência de oxigênio, promove a conversão da matéria orgânica em metano (CH_4) por ação de consórcios microbianos. Seu desempenho depende de fatores como a composição do substrato, concentração do substrato, potencial hidrogeniônico (pH), temperatura e tempo de detenção hidráulica e fornecimento adequado de nutrientes e agentes alcalinizantes. A DA pode ser conduzida em sistema de estágio único ou de dois estágios, sendo que este último permite a separação entre as fases iniciais (hidrólise e acidogênese) e finais (acetogênese e metanogênese) da conversão biológica, favorecendo o controle específico de variáveis operacionais em cada fase. O presente estudo teve como objetivo identificar a combinação de meio nutricional e agente alcalinizante mais eficaz para maximizar a produção de metano a partir da fração líquida dos RFV, e, posteriormente, comparar o desempenho de sistemas de digestão anaeróbia em um e dois estágios. Foram testadas diferentes combinações de suplementos nutricionais, incluindo um meio otimizado, e agentes alcalinizantes (bicarbonato de amônio, bicarbonato de sódio e carbonato de cálcio) por meio de ensaios do tipo batelada. Primeiramente, foram analisados os efeitos isolados de cada aditivo nos dois sistemas. Em seguida, foi avaliada a interação entre meios nutrientes e alcalinizantes para identificar as condições mais eficazes para a produção de CH_4 . Os resultados indicaram que o sistema de dois estágios apresentou desempenho superior (282mL CH_4) ao de estágio único (182mL CH_4), com um aumento de aproximadamente 55% na produção de metano. A combinação mais eficiente foi o meio nutricional otimizado associado ao bicarbonato de amônio, que atingiu 282mL CH_4 , representando o maior rendimento obtido nos ensaios. Verificou-se que o desempenho da DA é amplamente influenciado pela interação entre aspectos químicos e bioquímicos do processo, sendo essencial o ajuste combinado da alcalinidade e da nutrição para aperfeiçoar a conversão do substrato em energia. Os resultados reforçam a viabilidade do aproveitamento energético de resíduos orgânicos urbanos por meio da DA, especialmente em configurações de melhor desempenho.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia. Sustentabilidade energética. Valorização de resíduos orgânicos.

ABSTRACT

Population growth and the expansion of urban areas have significantly increased energy demand, requiring sustainable solutions that reconcile energy efficiency with environmental preservation. At the same time, the generation of large volumes of organic waste, especially in distribution centers such as the Supply Centers (CEASA), poses a challenge for urban solid waste management. In Ceará, the CEASA unit in Maracanaú discards, on average, 13.7 tons per day of fruit and vegetable waste (FVW), which, due to its high organic load, has potential for biogas production through anaerobic digestion (AD). This biological process, carried out in the absence of oxygen, converts organic matter into methane (CH_4) through the action of microbial consortia. Its performance depends on factors such as substrate composition and concentration, hydrogen potential (pH), temperature, hydraulic retention time, and adequate supply of nutrients and alkalizing agents. AD can be conducted in a single-stage or two-stage system, with the latter allowing the separation of the initial phases (hydrolysis and acidogenesis) from the final phases (acetogenesis and methanogenesis) of biological conversion, thus enabling specific control of operational variables in each phase. This study aimed to identify the most effective combination of nutrient medium and alkalizing agent to maximize methane production from the liquid fraction of FVW and subsequently compare the performance of single- and two-stage AD systems. Different combinations of nutritional supplements, including an optimized medium, and alkalizing agents (ammonium bicarbonate, sodium bicarbonate, and calcium carbonate) were tested in batch assays. First, the isolated effects of each additive in both systems were analyzed. Then, the interaction between nutrient media and alkalizing agents was evaluated to determine the most effective conditions for CH_4 production. Results indicated that the two-stage system achieved superior performance (282 mL CH_4) compared to the single-stage system (182 mL CH_4), representing an increase of approximately 55% in methane production. The most efficient combination was the optimized nutrient medium associated with ammonium bicarbonate, which reached 282 mL CH_4 , the highest yield obtained in the experiments. It was found that AD performance is strongly influenced by the interaction between the chemical and biochemical aspects of the process, making the combined adjustment of alkalinity and nutrient supply essential for optimizing substrate-to-energy conversion. These results reinforce the feasibility of energy recovery from urban organic waste through AD, particularly in higher-performance configurations.

Keywords: Anaerobic digestion. Energy sustainability. Organic waste valorization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas do experimento	28
Figura 2 – Esquema experimental da análise de três meios nutricionais: (i) macro e micronutrientes, (ii) meio Endo e (iii) meio otimizado.	31
Figura 3 – Esquema experimental da análise de alcalinizantes.	33
Figura 4 – Esquema ilustrativo da etapa de comparação.	38
Figura 5 – Produção acumulada de metano a partir do efeito do nutriente.	41
Figura 6 – Produção acumulada de metano a partir do efeito do alcalinizante	42
Figura 7 – Produção acumulada de metano do planejamento com RFVL.	44
Figura 8 – Produção acumulada de metano a partir do efeito do nutriente com RFVA	45
Figura 9 – Produção acumulada de metano a partir do efeito de alcalinizantes com RFVA	46
Figura 10 – Produção acumulada de metano do planejamento com RFVA	47
Figura 11 – Produção acumulada de metano na comparação de sistema de um e dois estágios	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização nutricional do RFV	30
Tabela 2 - Composição macronutrientes e micronutrientes.	32
Tabela 3 - Composição Endo adaptado.	32
Tabela 4 - Composição meio otimizado.	33
Tabela 5 – Composição das bateladas com a combinação de macro e micronutrientes e NH_4HCO_3 .	34
Tabela 6 – Composição das bateladas com a combinação de macro e micronutrientes e CaCO_3 .	34
Tabela 7- Composição das bateladas com a combinação de meio otimizado e NH_4HCO_3 .	35
Tabela 8 - Composição das bateladas com a combinação de meio otimizado e CaCO_3 .	35
Tabela 9 – Composição das bateladas de RFVA com a combinação de macro e micronutrientes e NH_4HCO_3 .	36
Tabela 10 – Composição das bateladas de RFVA com a combinação de macro e micronutrientes e CaCO_3 .	36
Tabela 11 - Composição das bateladas de RFVA com a combinação de meio otimizado e NH_4HCO_3 .	37
Tabela 12 - Composição das bateladas de RFVA com a combinação de meio otimizado e CaCO_3 .	37
Tabela 13 – Composição das bateladas de um estágio.	38
Tabela 14 – Composição das bateladas de dois estágios	38
Tabela 15 – Caracterização RFVL	39
Tabela 16 – Caracterização RFVA	40
Tabela 17 – Produtos intermediários do RFVA	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	Ácidos graxos voláteis
AI	Alcalinidade intermediária
AME	Atividade metanogênica específica
AnSTBR	Reator anaeróbio de leito estruturado
AP	Alcalinidade parcial
AT	Alcalinidade total
C/N	Relação carbono/nitrogênio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CEASA	Central de Abastecimento
CH ₄	Metano
Co	Cobalto
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Carga orgânica volumétrica
DA	Digestão anaeróbia
DQO	Demanda química de oxigênio
Fe	Ferro
H ₂	Hidrogênio
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio gasoso
NaHCO ₃	Bicarbonato de sódio
NH ₃	Amônia livre
NH ₄ HCO ₃	Bicarbonato de amônio
Ni	Níquel
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
pH	potencial Hidrogeniônico
RFV	Resíduos de frutas e verduras
RFVA	Resíduo de frutas e verduras acidificado
RFVL	Resíduo de frutas e verduras fração líquida
RFVS	Resíduo de frutas e verduras fração sólida

S	Enxofre
Se	Selênio
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TDH	Tempo de detenção hidráulica
	Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (<i>Upflow anaerobic sludge</i>
UASB	<i>blanket</i>)
W	Tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVOS GERAIS	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS (RFV)	19
3.2	DIGESTÃO ANAERÓBIA	20
3.3	REATORES DE DOIS ESTÁGIOS	22
3.4	SUPLEMENTAÇÃO NUTRICIONAL	23
3.5	ALCALINIZANTES	25
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS	29
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO RFVL	29
4.3	INÓCULO	29
4.4	RESÍDUO DE FRUTAS E VERDURAS ACIDIFICADO	29
4.5	MONTAGEM DOS ENSAIOS	30
4.5.1	Análise nutricional	31
4.5.2	Análise de alcalinizantes	33
4.5.3	Combinação RFVL	34
4.6	BATELADAS - 2º FASE	35
4.6.1	Análise nutricional	35
4.6.2	Análise de alcalinizantes	35
4.6.3	Combinação RFVA	36
4.7	COMPARAÇÃO - 3º FASE	37
5	RESULTADOS	39
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO RFVL	39
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO RFVA	39
5.3	BATELADAS – 1º FASE	40
5.3.1	Efeito do meio nutricional	40
5.3.2	Análise de alcalinizantes	41

5.3.3	Combinação	43
5.4	BATELADAS – 2º FASE	44
5.4.1	Efeito do meio nutricional	44
5.4.2	Análise de alcalinizantes	45
5.4.3	Combinação	46
5.5	BATELADAS – 3º FASE	47
6	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional acelerado tem intensificado os desafios relacionados à segurança alimentar, gestão de resíduos e demanda energética. Segundo projeções da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial deve ultrapassar os 9,7 bilhões até 2050, o que implicará em um aumento substancial na produção e consumo de alimentos, bem como no uso de recursos energéticos. Esse cenário impõe à sociedade a necessidade de adotar soluções integradas, sustentáveis e tecnologicamente viáveis para mitigar os impactos ambientais associados ao modelo atual de produção e consumo (FAO, 2021; UN, 2019).

Paralelamente ao crescimento da população e da demanda por alimentos, observa-se um grave problema de desperdício alimentar. Estima-se que aproximadamente um terço de toda a produção global de alimentos é perdida ou desperdiçada, totalizando cerca de 1,3 bilhão de toneladas por ano (FAO, 2013). Frutas, legumes e hortaliças, por sua constituição rica em água, são altamente perecíveis, o que contribui significativamente para perdas ao longo da cadeia produtiva, afetando tanto a qualidade quanto a quantidade dos produtos que chegam ao consumidor final (UFVJM, 2023). Esse descarte em larga escala, quando mal gerenciado, resulta na emissão de gases de efeito estufa, principalmente metano (CH_4), a partir da decomposição anaeróbia em lixões, contribuindo diretamente para o aquecimento global e para o agravamento das mudanças climáticas (IPCC, 2021).

Diante desse contexto, a valorização energética dos resíduos alimentares por meio de processos biotecnológicos ganha destaque como uma estratégia ambientalmente responsável e economicamente viável. A digestão anaeróbia (DA) vem sendo reconhecida como uma alternativa sustentável para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, especialmente resíduos alimentares, devido à sua viabilidade ambiental e econômica no contexto de uma bioeconomia circular (Alengebawy *et al.*, 2024). Essa tecnologia promove a decomposição da matéria orgânica por consórcios microbianos em ambiente sem oxigênio, gerando como produtos principais o biogás (composto majoritariamente por CH_4 e dióxido de carbono – CO_2) e o digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante (Appels *et al.*, 2008). O biogás produzido pode ser utilizado para geração de energia térmica e elétrica e, após purificação, transformado em biometano com capacidade de substituir combustíveis fósseis, contribuindo significativamente para a matriz energética renovável (Mertins e Wawer, 2022; Machmud *et al.*, 2022).

Frutas e verduras, por possuírem elevado teor de umidade e alta concentração de sólidos voláteis (SV) biodegradáveis, apresentam excelente potencial como substrato para a DA. Entretanto, sua rápida biodegradabilidade pode levar a um acúmulo excessivo de ácidos graxos voláteis (AGVs), queda do potencial hidrogeniônico (pH) e inibição da atividade metanogênica, especialmente em sistemas com baixa alcalinidade e sem suplementação adequada de nutrientes (Raposo *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2022). Além disso, substratos com baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) favorecem a liberação de amônia livre (NH₃), que pode inibir os microrganismos metanogênicos, prejudicando o processo de DA (Wang *et al.*, 2014). Por esses motivos, o sucesso da DA depende do controle de variáveis-chave como pH, alcalinidade, disponibilidade de nutrientes, tempo de detenção hidráulica (TDH) e configuração do sistema reator, que garantem a estabilidade microbiana e o bom desempenho do processo (Adekunle e Okolie, 2015).

Além de sua alta perecibilidade e potencial energético, os resíduos de frutas e verduras (RFV) apresentam elevada heterogeneidade, com composição físico-química variável conforme sazonalidade, tipo de produto, estágio de maturação e condições de armazenamento e manejo pós-colheita. Essa variabilidade impacta diretamente parâmetros como teor de umidade, C/N, concentração de SV, teor de açúcares, proteínas, lignocelulose e a presença de compostos inibidores, afetando o desempenho e a estabilidade da DA (Xu *et al.*, 2018). Tanto a fração líquida quanto a sólida dos resíduos de frutas e verduras podem ser utilizadas como substrato para digestão anaeróbia, a depender das características do processo e da configuração do sistema (Li *et al.*, 2018; Bolzonella *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2018). No presente trabalho, será utilizado como substrato o resíduo orgânico composto predominantemente por frutas e verduras descartadas, coletado na Central de Abastecimento do Ceará (CEASA), em Maracanaú (CE). Conforme Silva-Júnior *et al.* (2022), a CEASA Maracanaú operacionaliza a distribuição de grande parte dos produtos hortícolas que abastecem Fortaleza e sua Região Metropolitana, sendo gerados volumes expressivos de resíduos diariamente, incluindo cascas, talos e subprodutos de frutas como laranja, mamão, melancia, banana e hortaliças folhosas, com significativo potencial para produção de biogás.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

- Avaliar estratégias para maximizar a produção de CH_4 a partir da fração líquida do resíduo de frutas e verduras (RFVL), por meio da seleção dos meios nutriente e alcalinizante mais eficazes em efeito combinado e da comparação entre sistemas de digestão anaeróbia em um e dois estágios, utilizando ensaios em bateladas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência de três diferentes meios nutrientes na produção de metano a partir de RFVL em ensaios batelada;
- Verificar o efeito de diferentes agentes alcalinizantes - bicarbonato de sódio (NaHCO_3), bicarbonato de amônio (NH_4HCO_3) e carbonato de cálcio (CaCO_3) - sobre a estabilidade do pH e a produtividade de CH_4 a partir de RFVL;
- Investigar a interação entre os tipos de meio nutriente e alcalinizante quanto à produção de metano em um e dois estágios;
- Comparar o desempenho dos sistemas de DA em um e dois estágios quanto à produção de CH_4 .

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Resíduo de frutas e verduras (RFV)

A produção mundial de frutas e vegetais atinge anualmente aproximadamente 1.728 milhões de toneladas, com o Brasil sendo líder nesse mercado, o país se posiciona como o terceiro maior produtor de frutas globalmente e o terceiro maior produtor de hortaliças nas Américas (Edwiges *et al.*, 2018). Os RFV são gerados em grandes quantidades em todo o mundo como resultado da cadeia de processamento dos alimentos, contudo, cerca de 15% a 25% desses alimentos são desperdiçados (Edwiges *et al.*, 2018; Nanda *et al.*, 2016).

O descarte de grandes volumes de resíduos orgânicos úmidos provenientes do processamento de frutas e hortaliças gera desafios econômicos e ambientais (Lane, 1984).

Os mercados atacadistas produzem grandes quantidades de RFV, que frequentemente são descartados por meio de despejo, espalhamento no solo ou alimentação animal (Lane, 1984). No entanto, essa matéria-prima pode ser facilmente coletada em grande escala, oferecendo uma excelente oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias de gestão mais eficientes (Arhou *et al.*, 2019; Lane, 1984).

De acordo com Agrawal *et al.* (2023), os RFV apresentam alta umidade, baixo teor de sólidos totais (ST) e elevado teor de sólidos voláteis (SV), características que os tornam substrato ideal para a digestão anaeróbia (DA) (Tabela 1). A DA é especialmente adequada para materiais orgânicos com alto teor de umidade ou resíduos semissólidos, sendo estimado que esse material possa gerar até 4.000 milhões de m³ de biogás por ano, correspondendo a um potencial energético de aproximadamente 86.000 TJ anualmente. Tal aproveitamento contribuiria para mitigar a crise energética, ao mesmo tempo em que oferece uma solução ambientalmente amigável para o tratamento de resíduos.

Alkanok *et al.* (2014) utilizou como substrato para DA de RFV oriundos de supermercados, obtendo rendimento de CH₄ de até 0,40 L CH₄/g SV em um sistema de estágio único de RFV (5 % ST).

Tabela 1 – Comparação da caracterização físico-química de resíduos de frutas e vegetais (RFV) entre diferentes estudos.

Parâmetro	Unidade	Silva Júnior et al. (2022)	Ambaye et al. (2020)	Edwiges et al. (2018)
DQO total	g/kg peso úmido	138,13 ± 12,40	70,7 ± 10,1	143 ± 17
Sólidos Totais (ST)	%	13,00 ± 0,20	11,5 ± 0,1	12,9 ± 1,7
Umidade	%	86,90 ± 0,20	88,5 ± 0,1	87,1 ± 0,8
Sólidos Voláteis (SV)	% ST	94,10 ± 0,30	85,7 ± 0,1	93,8 ± 0,5
Carboidratos	% peso úmido	55,0 ± 1,2	–	55,2 ± 0,8
Lipídios	% peso úmido	0,80 ± 0,16	–	2,7 ± 0,1
Proteínas brutas	% peso úmido	2,25 ± 0,49	–	1,5 ± 0,6
Nitrogênio Total Kjeldahl	g/kg peso seco	9,3 ± 0,4	8,0 ± 0,2	2,2 ± 0,1
Fósforo Total	g/kg peso seco	0,29 ± 0,02	500,0 ± 0,1*	–
Ferro	mg/kg peso seco	242,19 ± 12,95	500,0 ± 0,1*	105,7 ± 16,2
Zinco	mg/kg peso seco	23,09 ± 0,10	<LD	5,7 ± 1,29
Cobre	mg/kg peso seco	21,11 ± 0,31	<LD	<LD

Fonte: Silva Júnior *et al.* (2022)

3.2 Digestão anaeróbia

A DA é um processo biológico realizado por um consórcio de microrganismos em ambiente isento de oxigênio, no qual a matéria orgânica é decomposta em compostos mais

simples. Essa via metabólica pode ser encontrada naturalmente em ambientes anóxicos, como sedimentos aquáticos, pântanos, trato gastrointestinal de animais ruminantes, entre outros. Em sistemas controlados, a DA tem sido amplamente aplicada no tratamento de diversos substratos orgânicos, incluindo resíduos agrícolas, efluentes industriais, resíduos sólidos urbanos e subprodutos da agroindústria (Ward *et al.*, 2008).

A DA converte resíduos orgânicos complexos em dois produtos principais: o biogás, composto predominantemente por CH_4 e CO_2 , e o digestato, um efluente semissólido rico em nutrientes. Este processo é energeticamente favorável e ambientalmente eficiente, uma vez que reduz a carga poluente dos resíduos e gera energia renovável, além de possibilitar o aproveitamento do digestato como biofertilizante (Ward *et al.*, 2008; Agrawal *et al.*, 2023).

Segundo Cavaleiro e Alves (2020), a DA é composta por cinco etapas bioquímicas interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese, homoacetogênese e metanogênese. Na hidrólise, enzimas extracelulares decompõem macromoléculas como proteínas, polissacarídeos e lipídios em unidades menores como aminoácidos, monossacarídeos e ácidos graxos. Esses produtos são então fermentados durante a acidogênese, originando AGVs, álcoois, acetato, H_2 e CO_2 . A acetogênese transforma os AGVs e álcoois em acetato e hidrogênio, por meio de bactérias sintróficas, cuja atividade é termodinamicamente viável apenas sob baixas pressões parciais de H_2 , o que demanda uma cooperação estreita com arqueas metanogênicas consumidoras de H_2 , caracterizando um processo de sintrofia.

Em paralelo, na etapa de homoacetogênese, alguns microrganismos são capazes de converter diretamente H_2 e CO_2 em acetato, ou ainda compostos multicarbonados. Por fim, a metanogênese encerra o processo, com arqueas metanogênicas convertendo os produtos anteriores, principalmente acetato, H_2 e CO_2 , em CH_4 . Destacam-se nesta fase os gêneros *Methanosaeta*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum* e *Methanobacterium* (Cavaleiro e Alves, 2020).

A eficiência do processo depende de uma série de fatores operacionais, incluindo a natureza do substrato, teor de umidade, teor de ST e SV, C/N ideal entre 20:1 e 30:1, disponibilidade de macro e micronutrientes, além de condições ambientais como pH (entre 6 e 8) e temperatura, com faixas ideais nos regimes mesofílico (30–38 °C) e termofílico (49–57 °C) (Agrawal *et al.*, 2023). O tipo de reator e o TDH também são determinantes para o rendimento e estabilidade do processo (Ward *et al.*, 2008).

Portanto, além de representar uma solução eficaz para o tratamento de resíduos orgânicos, a digestão anaeróbia contribui significativamente para a produção de energia limpa e a mitigação de impactos ambientais, sendo uma ferramenta estratégica dentro da economia circular e dos compromissos globais de sustentabilidade.

3.3 Reatores de dois estágios

Os sistemas de dois estágios tendem a separar os processos de hidrólise/acidificação dos processos de acetogênese/metanogênese em dois reatores em série, uma vez que estes não compartilham as mesmas condições ambientais ideais (Ward *et al.*, 2008). Separar as fases da DA é importante para otimizar o processo, uma vez que o primeiro estágio age como um tampão contra a alta taxa de carga orgânica, o que oferece alguma proteção aos metanogênicos, esses mais sensíveis, à acidificação, à sobrecarga orgânica e a compostos tóxicos (Ward *et al.*, 2008).

Apesar de o pH ideal da metanogênese ser em torno de 7,0, o pH ideal de hidrólise e acidogênese foi relatado como estando entre pH 5,5 e 6,5. Esta é uma razão importante pela qual adotam a separação dos processos de hidrólise/acidificação e acetogênese/metanogênese em processos de dois estágios (Kim *et al.*, 2003a,b; Yu e Fang, 2002).

Na fase acidogênica, estudos indicam que a operação em regime termofílico (50–55 °C) favorece a solubilização de matéria orgânica complexa, acelerando os processos de hidrólise e fermentação ácida. Em estudo com lodo ativado residual, Demirer e Chen (2008) relataram taxas de carga de SV entre 6,5 e 28,9 g SV/(L·d), valores que foram considerados como indicativos de elevada capacidade de degradação nessa etapa, além de favorecerem o aumento na disponibilidade de substratos solúveis para a fase metanogênica. Essa tendência foi confirmada por Zhu, Stadnyk, Béland e Seto (2008), que testaram diferentes configurações térmicas (mesofílico-mesofílico, mesofílico-termofílico, termofílico-termofílico) na digestão de resíduos de batata. A combinação termofílico para acidogênese e mesofílico para metanogênese demonstrou maior eficiência na conversão de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e maior produção de CH₄. A carga orgânica volumétrica (COV) máxima aplicada à fase acidogênica foi de 36gDQO/(L.d), enquanto a fase metanogênica mesofílica comportou até 11gDQO/(L.d) sem comprometer a estabilidade do processo.

Segundo Rubio-Loza e Noyola (2010), a distinção entre cargas aplicadas deve-se principalmente à sensibilidade dos microrganismos metanogênicos a variações bruscas de pH e à inibição por ácidos graxos voláteis (AGVs). Por essa razão, a operação da fase metanogênica

em temperatura mesofílica (35–37 °C) é preferível, pois proporciona maior estabilidade microbiológica e eficiência na produção de CH₄. Em estudo com lodo municipal, os autores verificaram que a etapa acidogênica operada a 55 °C, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 2 dias, foi capaz de gerar alta concentração de AGVs, atingindo cerca de 3.200 mg/L, com destaque para o ácido acético (1.259 mg/L) e o ácido propiônico (1.460 mg/L). No entanto, quando a fase metanogênica foi mantida em condições termofílicas, observou-se acúmulo de propionato e redução na eficiência de metanização, possivelmente devido à sobrecarga ou deficiência de micronutrientes. A configuração mais estável identificada foi a termofílica para acidogênese seguida de mesofílica para metanogênese.

Bouallagui *et al.* (2004) constataram em seu estudo que a separação das fases de acidificação e metanogênese, por meio de reatores de batelada, proporcionou maior estabilidade ao processo. Na etapa de acidificação, o rendimento de hidrólise atingiu 81 % quando a taxa de carga orgânica foi ajustada para 7,5 g DQO/L d, gerando uma concentração máxima de AGVs de cerca de 13,3 g/L. Na segunda fase, voltada à metanogênese, os produtos da acidificação foram convertidos com eficiência, resultando em uma produtividade de CH₄ de 320 L CH₄ por kg de DQO introduzida.

Fongsatitkul *et al.* (2012) analisaram a digestão anaeróbia em dois estágios da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, focando na produção de metano. A configuração experimental separou a fase acidogênica da metanogênica, possibilitando otimização independente das condições operacionais em cada etapa. Foram testadas três concentrações de ST (8%, 12% e 15%) e TDH na fase metanogênica variando entre 15 e 30 dias. Os melhores resultados de produção de CH₄ foram obtidos com 12% de ST e 30 dias de TDH, atingindo 0,45 L CH₄/g SV alimentado. Em condições menos favoráveis, com 8% de sólidos e TDH de 15 dias, a produção foi de apenas 0,14 L CH₄/g SV. O estudo demonstrou que a separação das fases permite maior controle sobre os processos microbiológicos, resultando em melhor eficiência na degradação da matéria orgânica e maior produção de CH₄ em comparação com sistemas convencionais de fase única.

3.4 Suplementação nutricional

Os oligoelementos são fundamentais para o crescimento celular dos microrganismos responsáveis pela DA. Certos tipos de substratos sólidos e culturas energéticas podem ser deficientes em micronutrientes específicos, sendo necessária sua suplementação para garantir a

atividade dos microrganismos anaeróbios (Lindorfer *et al.*, 2007). Mesmo quando presentes no substrato, esses elementos nem sempre estão biodisponíveis, o que pode comprometer o desempenho do processo de DA (Climenhaga e Banks, 2008). No entanto, deficiências ou excessos podem passar despercebidos devido à variabilidade das fontes de nutrientes presentes no substrato. Para que o sistema anaeróbio funcione de maneira eficiente, é essencial complementá-lo com macro e micronutrientes sempre que houver escassez desses elementos (Agrawal *et al.*, 2023).

De acordo com Romero-Guiza *et al.* (2016), os macronutrientes, como fósforo (P), nitrogênio (N) e enxofre (S), são essenciais para a composição da biomassa e para a regulação do pH do sistema. Por sua vez, os micronutrientes, como ferro (Fe), níquel (Ni), molibdênio (Mo), cobalto (Co), tungstênio (W) e selênio (Se), atuam como cofatores fundamentais em diversas reações enzimáticas envolvidas na formação de CH₄. Entretanto, o excesso de certos micronutrientes pode comprometer o desempenho do sistema. Metais como Ni, Co e Fe exercem papel crucial na metanogênese, especialmente nas vias acetoclástica e hidrogenotrófica, pois funcionam como cofatores essenciais de enzimas como a desidrogenase do monóxido de carbono, a descarboxilase da acetil-CoA, a metiltransferase da metil-H SPT:HS-CoM, a redutase da metil-CoM, entre outras responsáveis pela conversão do carbono em CH₄.

Kayhanian e Rich (1995) testaram a inclusão de vários elementos metálicos em um sistema termofílico, resultando em um aumento de quase 30% na produção de biogás e maior estabilidade do digestor.

Güngör-Demirci e Demirer (2004) investigaram o efeito da suplementação com macro e micronutrientes em reatores anaeróbios operando com esterco de frango e bovino. A adição desses nutrientes resultou em aumentos significativos na produção de metano, de apenas 128,6 a 205,3mL CH₄ em reatores não suplementados, para até 1.044,9mL em sistemas suplementados. Além disso, a suplementação contribuiu para reduzir o acúmulo de AGVs e estabilizar o processo, favorecendo a digestão mesmo sob altas cargas orgânicas.

Climenhaga e Banks (2008) demonstraram a importância dos micronutrientes na digestão de matéria-prima de resíduos alimentares mistos. Os reatores suplementados com oligoelementos apresentaram digestão estável, alcançando produções de metano entre 280 e 350 L CH₄/kg SV dependendo do TDH. Em contraste, os reatores não suplementados apresentaram falha metanogênica: no TDH de 25 dias, a produção cessou após cerca de 40 dias de operação; com 50 dias, após 100 dias; e com 100 dias, a falha ocorreu após aproximadamente

90 dias, sempre acompanhada pelo acúmulo de AGV. Apenas no TDH mais longo, de 180 dias, os reatores sem suplementação conseguiram manter a produção estável ($\sim 330 \text{ L CH}_4/\text{kg SV}$), ainda que sob condições adversas de elevada concentração de NH_3 e AGV's.

3.5 Alcalinizantes

A alcalinidade, frequentemente referida como capacidade tampão na DA, representa a resistência do sistema a variações abruptas de pH. Essa resistência é conferida principalmente pela presença de íons bicarbonato, derivados do equilíbrio com o CO_2 dissolvido (Ward et al., 2008). Assim, a alcalinidade está diretamente relacionada à estabilidade do ambiente microbiano, sendo essencial para manter condições ótimas à atividade das bactérias metanogênicas.

Em ambientes anaeróbios, a alcalinidade pode ser classificada como total (AT), parcial (AP – bicarbonatos) e intermediária (AI – ácidos graxos voláteis), permitindo avaliar o estado do processo com mais precisão (Morales-Polo et al., 2019). O pH, embora útil como indicador geral, pode não refletir mudanças súbitas nos níveis de AGVs, por isso a análise conjunta da relação AGV/Alcalinidade se mostra mais eficaz.

A análise da AP, AI e AT é fundamental para compreender o equilíbrio químico e a capacidade de tamponamento na digestão anaeróbia. Conforme descrito por Trujillo-Reyes et al. (2022), a AT corresponde à soma de AP e AI, refletindo o efeito combinado de todos os sistemas tamponantes presentes no reator. Ainda segundo os autores, a AP está associada principalmente ao sistema bicarbonato/carbonato e ao equilíbrio amônio/amônia, desempenhando papel central no controle do pH. A AI, por sua vez, representa a contribuição das formas não protonadas dos ácidos graxos voláteis (AGVs) e é obtida pela diferença entre AT e AP (Trujillo-Reyes *et al.*, 2022). Essa caracterização é comumente realizada por titulação, utilizando pontos de pH específicos (próximos de 5,75 e 4,30) que permitem identificar a participação de diferentes espécies químicas (Trujillo-Reyes *et al.*, 2022). Em digestores mesofílicos alimentados com resíduos sólidos orgânicos, valores entre 2.000 e 4.000 $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$ são considerados típicos para operação estável. (Trujillo-Reyes *et al.*, 2022). Esses diferentes tipos de alcalinidade, suas origens químicas e seu papel no equilíbrio do sistema estão sintetizados na Tabela 2, adaptada de Trujillo-Reyes *et al.* (2022).

Tabela 2 – Tipos de alcalinidade na digestão anaeróbia e suas características.

Tipo de alcalinidade	Definição	Principais componentes	Forma de determinação	Importância no monitoramento
Alcalinidade Total (AT)	Soma de todas as formas de alcalinidade presentes no sistema.	Bicarbonatos, carbonatos, amônia/amônio e AGVs não protonados.	Titulação até pH ~4,30.	Representa a capacidade global de tamponamento do meio.
Alcalinidade Parcial (AP)	Fração da AT associada ao sistema bicarbonato/carbonato e ao equilíbrio amônia/amônio.	HCO_3^- , CO_3^{2-} , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$.	Titulação até pH ~5,75.	Principal mecanismo de controle do pH no reator.
Alcalinidade Intermediária (AI)	Fração da AT associada às formas não protonadas dos ácidos graxos voláteis.	AGVs (acetato, propionato, butirato etc.).	Diferença entre AT e AP.	Indica acúmulo de ácidos e possível risco de acidificação.
Razão AI/AP	Relação entre AI e AP.	—	Cálculo direto a partir das titulações.	Valores >0,3–0,4 indicam instabilidade e risco de acidificação.

Fonte: Adaptado de Trujillo-Reyes *et al.* (2022).

A relação AGV/Alcalinidade é amplamente utilizada como parâmetro de controle da estabilidade: valores abaixo de 0,3 indicam um sistema tamponado e estável, enquanto valores superiores a 0,8 sugerem acúmulo de AGVs e risco de acidificação, podendo levar à inibição da produção de CH_4 (Kondusamy; Kalamdhad, 2014). O monitoramento contínuo dessa razão é, portanto, essencial para antecipar falhas no processo e ajustar cargas orgânicas ou intervenções de pré-tratamento.

O estudo de Hao *et al.* (2022) demonstraram que o NH_4HCO_3 promove a recuperação da oxidação de AGVs em substratos com baixa C/N, por meio da formação de um sistema tampão $\text{HCO}_3^-/\text{NH}_4^+$ que mantém o pH na faixa ideal para a metanogênese (6,8–7,5).

Valença *et al.* (2021) investigaram o efeito de diferentes concentrações de NaHCO_3 (1,5 %, 4,5 %, 11 %, 28 % e 111 %) sobre o potencial de geração de CH_4 a partir de resíduos orgânicos alimentares, utilizando dois tipos de lodo como inóculo: granular industrial e floculento de esgoto. Os resultados demonstraram que a concentração de 11 % de NaHCO_3 , associada ao lodo granular, proporcionou o maior rendimento, atingindo 214 NmL CH_4 /g de sólidos voláteis e um biogás com 78 % de teor de CH_4 . O estudo evidenciou que o NaHCO_3 atua como um eficaz agente tamponante, promovendo a estabilidade do pH e evitando a inibição do processo por AGVs acumulados. Ainda, observou-se que tanto a ausência quanto o excesso de alcalinizante impactaram negativamente a produção de CH_4 , independentemente do tipo de inóculo utilizado (Valença *et al.*, 2021).

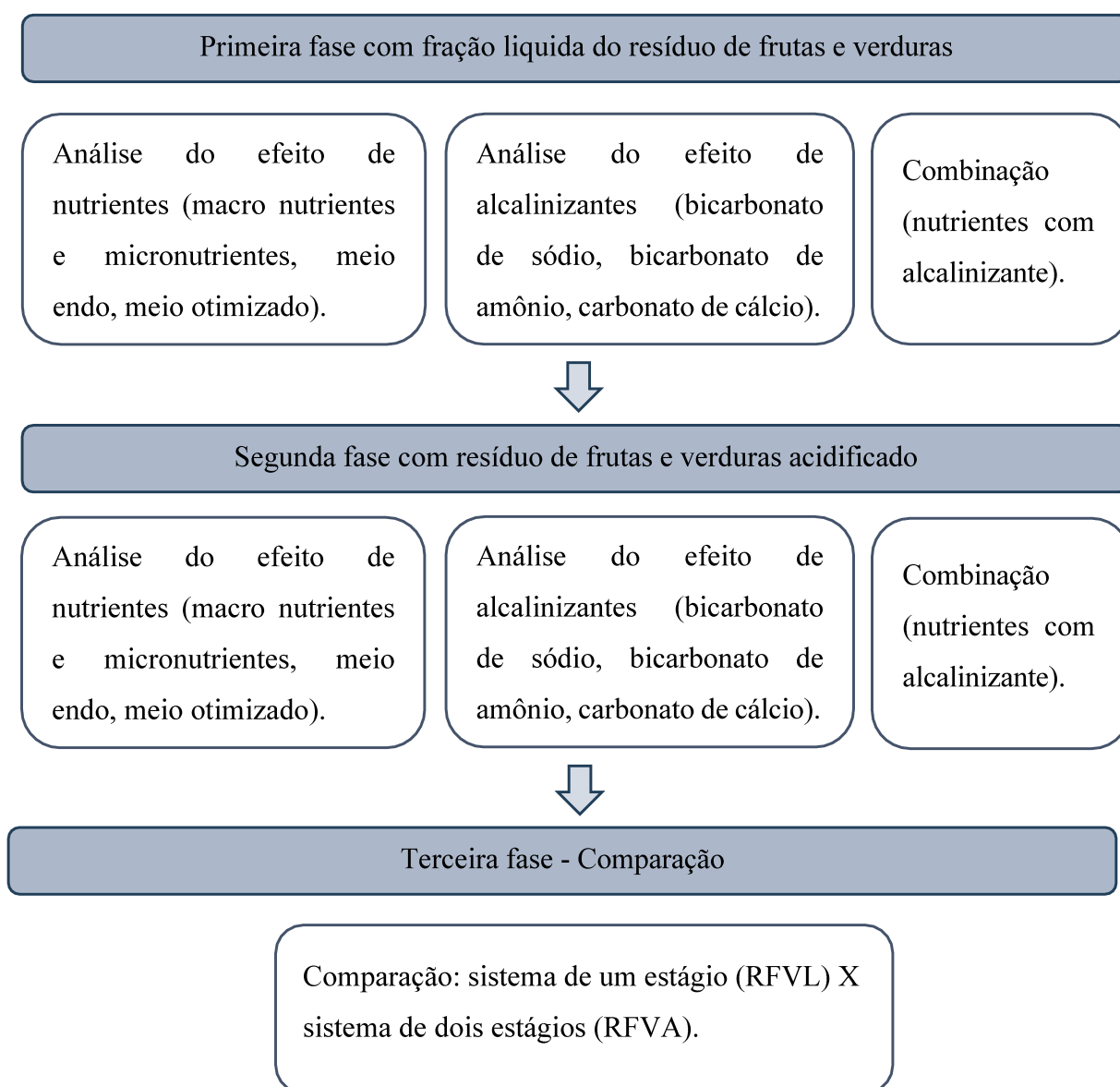
Chen *et al.* (2015) compararam diferentes agentes alcalinizantes, a adição de CaCO_3 elevou a produção de CH_4 de 120,2 para 197,0 mL CH_4 /g SV, superando inclusive o NaHCO_3 , que alcançou 156,2 mL CH_4 /g SV. Além disso, o CaCO_3 proporcionou uma alcalinidade final de 7.307 mg/L, promovendo um ambiente mais estável para a atividade metanogênica ao longo do processo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção estão descritos todos os materiais utilizados e a metodologia empregada na avaliação do efeito do meio nutricional e do alcalinizante na digestão de RFV em um e dois estágios.

Na Figura 1 está exposto através de um fluxograma as etapas do trabalho de forma simplificada.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

4.1 Resíduo de frutas e verduras

O RFV utilizado nos experimentos foi proveniente da Central de Abastecimentos do Ceará (CEASA), localizada em Maracanaú, Ceará, Brasil. Em um trabalho prévio, Silva-Júnior *et al.* (2022) realizaram questionários com os 1200 permissionários da CEASA para determinação da composição do RFV gerado. A composição do RFV, expressa em porcentagem, incluiu os seguintes itens, com as quantidades relativas apresentadas em parêntesis: laranja (42%), cebola (7,70%), milho (5,50%), mamão (5,40%), abacate (4,80%), melancia (3,40%), melão (3,10%), abacaxi (3,10%), banana (3%), batata (3%), repolho (2,40%), goiaba (1,20%), tomate (1%), pimentão (0,90%), beterraba (0,90%), maçã (0,70%), maracujá (0,40%), cenoura (0,40%) e abóbora (0,20%).

A partir da composição padrão, o resíduo foi coletado quinzenalmente e submetido a pré-tratamento. No pré-tratamento, o RFV era triturado e centrifugado para separação das frações sólida (RFVS) e líquida (RFVL), sendo a RFVL objeto desse estudo.

4.2 Caracterização do RFVL

A caracterização do RFVL foi realizada por meio da determinação de DQO₂ ST, SV e acidez (Apha, 2005). A caracterização nutricional do RFV foi realizada previamente por Silva-Júnior *et al.* (2022) (Tabela 3).

4.3 Inóculo

O inóculo utilizado foi retirado de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (*upflow anaerobic sludge blanket*, UASB), mesofílico, utilizado para tratamento de efluente de uma cervejaria em Pacatuba, Ceará, Brasil. O lodo apresentou uma concentração média de 0,07g/mL de ST, 0,05 g/mL de SV e 7,68 de pH.

4.4 Resíduo de frutas e verduras acidificado

A fração líquida do resíduo de frutas e verduras acidificado (RFVA) foi obtido a partir do efluente de um reator anaeróbio de leito estruturado (AnSTBR), de vidro, com volume total

de 4L, TDH 6h, COV 20 kg DQO/m³ d. (Menezes *et al.*, 2024). Para caracterização foram realizadas análises de DQO, ST, SV e acidez (Apha, 2005).

Tabela 3 – Caracterização nutricional do RFV

Nutriente	Massa
Potássio	22,7 ± 0,9 (g L ⁻¹)
Fósforo	2,8 ± 0,04 (g L ⁻¹)
Cálcio	2,6 ± 0,1 (g L ⁻¹)
Magnésio	1,6 ± 0,03 (g L ⁻¹)
Enxofre	1,5 ± 0,05 (g L ⁻¹)
Sódio	0,8 ± 0,02 (g L ⁻¹)
Ferro	0,7 ± 0,02 (g L ⁻¹)
Zinco	81,3 ± 1,9 (mg L ⁻¹)
Manganês	36,4 ± 1,3 (mg L ⁻¹)

Fonte: Silva-Júnior *et al.* (2022).

4.5 Montagem dos ensaios

O ensaio foi dividido em três etapas. Na primeira foi analisado o efeito de três diferentes meios nutricionais (macronutrientes e micronutrientes, meio endo e meio otimizado) na produção de CH₄, com bateladas durando 15 dias.

Na segunda etapa foi analisado o efeito de três alcalinizantes (NaHCO₃, NH₄HCO₃ e CaCO₃) na produção de CH₄, com uma duração de 15 dias.

Na terceira etapa, foi analisada a combinação do meio nutriente e alcalinizantes que foram considerados como melhores resultados nas etapas anteriores, e esse ensaio teve uma duração de 30 dias.

Os ensaios foram realizados em frascos de 300 mL (Schott, Alemanha) com volume de trabalho de 200mL, contendo 2,5 g DQO/L de substrato (RFVL/RFVA), 5 g SV/L de inóculo, meio nutricional e alcalinizante. Cada ensaio foi realizado em triplicata contendo um controle positivo (frasco alimentado com 2,5 g DQO/L de glicose, meio macronutrientes e micronutrientes e NaHCO₃) e um controle negativo (apenas com inóculo).

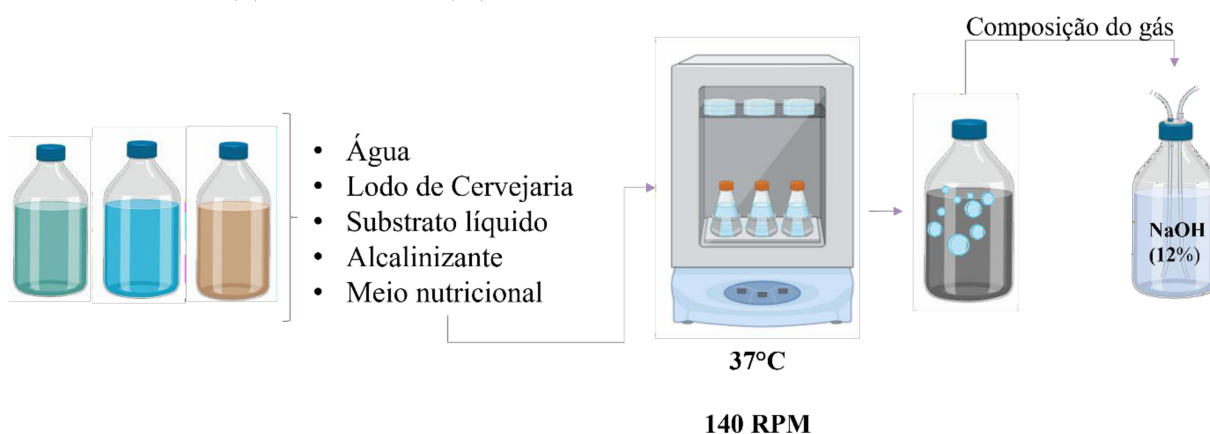
Depois de montados, foi injetado nitrogênio gasoso (N₂) em cada frasco por 3 minutos e posteriormente os frascos foram selados com uma rolha de borracha butílica e vedados com uma tampa de alumínio e mantidos a 37°C em agitação constante (140 rpm). A quantidade de

biogás produzida foi medida diariamente pelo método de deslocamento de fluidos (Walker *et al.*, 2009).

4.5.1 Análise nutricional

Na primeira etapa foi analisado o efeito de três soluções de meios nutricionais, a configuração experimental está representada na Figura 2. Dois deles foram selecionados a partir de levantamentos bibliográficos. O primeiro, macronutrientes e micronutrientes, foi adaptado por Cavalcante (2023) de Ma *et al.* (2009) e Romero-Güiza *et al.* (2016), onde a dose de nutriente é definida em função da DQO afluente, representados na Tabela 4.

Figura 2 – Esquema experimental da análise de três meios nutricionais: (i) macro e micronutrientes, (ii) meio Endo e (iii) meio otimizado.



Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 4 – Composição macronutrientes e micronutrientes.

Nutriente	Massa (mg/g-DQO)
Cloreto de amônio	300
Fosfato de potássio	150
Cloreto de magnésio hexahidratado	250
Cloreto de potássio	100
Cloreto de cálcio dihidratado	200
Sulfato de ferro heptahidratado	10
Cloreto de alumínio hexahidratado	2,01
Cloreto de zinco	1,18
Cloreto de níquel (II) hexahidratado	1,15
Tetradihidrato de hepta-molibdato(VI) de amônio	2,22
Cloreto de cobalto (II) hexahidratado	1,28
Cloreto de manganês (II) tetrahidratado	1,61
Sulfato de cobre (II) pentahidratado	2,22
Ácido bórico	0,12
Selenito de sódio	0,89
Bicarbonato de sódio	800

Fonte: Cavalcante (2023).

O segundo, meio Endo, adaptado por Menezes (2019) de Endo (1982). Sua composição está na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição Endo adaptado.

Nutriente	Massa (g L⁻¹):
Fosfato Monopotássico Hidrogenado	0,125
Cloreto de Magnésio Hexahidratado	0,015
Sulfato de Cobre (II) Pentahidratado	0,005
Cloreto de Cobalto (II) Pentahidratado	1,25.10 ⁻⁴

Fonte: Menezes (2019).

O terceiro meio nutricional, meio otimizado, foi formulado com base na análise elementar realizada na caracterização do RFV. Nessa formulação, foram subtraídos os

micronutrientes já presentes no resíduo e adicionados ao meio apenas os micronutrientes remanescentes, conforme composição apresentada na Tabela 6. A referência utilizada para essa formulação foi o meio nutricional proposto por Cavalcante (2023), que inclui macro e micronutrientes. No entanto, optou-se por não adicionar os macronutrientes, uma vez que a caracterização do RFV indicou concentrações adequadas desses elementos.

Tabela 6 – Composição meio otimizado.

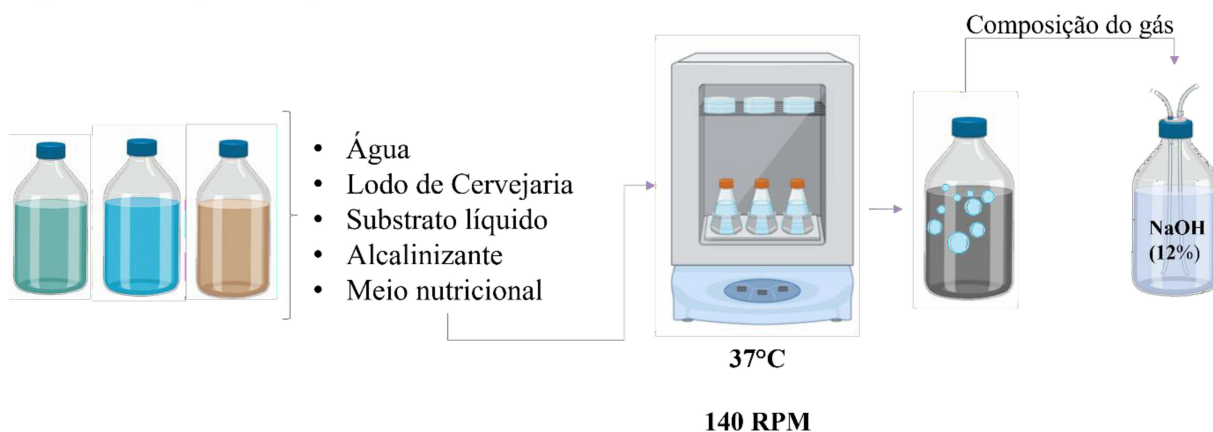
Nutriente	Massa (g/L)
Cloreto de alumínio hexahidratado	0,0153
Cloreto de níquel (II) hexahidratado	0,0243
Cloreto de cobalto (II) hexahidratado	0,3083
Heptamolibdato de amônio tetrahidratado	0,0175
Cloreto de cobre (II) dihidratado	0,0133
Ácido bórico	0,0125
Sulfito de sódio	0,0050

Fonte: Autor

4.5.2 Análise de alcalinizantes

Na segunda etapa foram analisados os efeitos de três alcalinizantes, NaHCO_3 , NH_4HCO_3 e CaCO_3 . Foi utilizado 0,50g de NaHCO_3 , 0,47g de NH_4HCO_3 e 0,41g de CaCO_3 em cada frasco, calculado pela concentração de carbonato. A Figura 3 ilustra o experimento.

Figura 3 – Esquema experimental da análise de alcalinizantes.



Fonte: Elaborado pela Autora.

4.5.3 Combinação RFVL

Na terceira etapa foi analisada a combinação de: i) macronutriente e micronutrientes com NH_4HCO_3 ; ii) macronutrientes e micronutrientes com CaCO_3 ; iii) meio otimizado com NH_4HCO_3 ; iv) e meio otimizado com CaCO_3 .

A composição de cada batelada está descrita nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7 – Composição das bateladas com a combinação de macro e micronutrientes e NH_4HCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	20,16mL
RFVL	4,20mL
Bicarbonato de amônio	0,47g
Macronutriente	10mL
Micronutriente	1mL
Água	164,17mL

Fonte: Autor

Tabela 8 – Composição das bateladas com a combinação de macro e micronutrientes e CaCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	20,16mL
RFVL	4,20mL
Carbonato de cálcio	0,41g
Macronutriente	10mL
Micronutriente	1mL
Água	164,22mL

Fonte: Autor

Tabela 9 – Composição das bateladas com a combinação de meio otimizado e NH_4HCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	20,16mL
RFVL	4,20mL
Bicarbonato de amônio	0,47g
Otimizado	1mL
Água	174,17mL

Fonte: Autor

Tabela 10 – Composição das bateladas com a combinação de meio otimizado e CaCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	20,16mL
RFVL	4,20mL
Carbonato de cálcio	0,41g
Otimizado	1mL
Água	174,22mL

Fonte: Autor

4.6 Bateladas - 2º fase

A segunda fase do ensaio em bateladas foi feita utilizando o RFVA, inóculo, água destilada, meio nutriente e alcalinizante.

A metodologia adotada foi a mesma utilizada na 1º fase.

4.6.1 *Análise nutricional*

Na primeira etapa da segunda fase dos ensaios foi analisado o efeito de três meios nutrientes já citados anteriormente. Foi utilizado 10mL de macronutrientes e 1mL de micronutrientes, 20mL de meio endo e 1mL de meio otimizado.

4.6.2 *Análise de alcalinizantes*

Na segunda etapa foram analisados os efeitos de três alcalinizantes, NaHCO_3 , NH_4HCO_3 e CaCO_3 . Foi utilizado 0,50g de NaHCO_3 , 0,47g de NH_4HCO_3 e 0,41g de CaCO_3 .

4.6.3 Combinação RFVA

Na terceira etapa foi analisada a combinação de: i) macronutriente e micronutrientes com NH_4HCO_3 ; ii) macronutrientes e micronutrientes com CaCO_3 ; iii) micronutrientes otimizado com NH_4HCO_3 ; iv) e meio micronutrientes otimizado com CaCO_3 na produção de CH_4 a partir do RFVA.

A composição de cada batelada está descrita nas Tabelas 11, 12, 13 e 14.

Tabela 11 – Composição das bateladas de RFVA com a combinação de macro e micronutrientes e NH_4HCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	13,70mL
RFVA	27,32mL
Bicarbonato de amônio	0,47g
Macronutrientes	10mL
Micronutrientes	1mL
Água	147,51mL

Fonte: Autor

Tabela 12 – Composição das bateladas de RFVA com a combinação de macro e micronutrientes e CaCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	13,70mL
RFVA	27,32mL
Carbonato de cálcio	0,41g
Macronutrientes	10mL
Micronutrientes	1mL
Água	147,56mL

Fonte: Autor

Tabela 13 – Composição das bateladas de RFVA com a combinação de meio otimizado e NH_4HCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de Cervejaria	13,70mL
RFVA	27,32mL
Bicarbonato de amônio	0,47g
Otimizado	1mL
Água	157,51mL

Fonte: Autor

Tabela 14 – Composição das bateladas de RFVA com a combinação de meio otimizado e CaCO_3 .

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	13,70mL
RFVA	27,32mL
Carbonato de cálcio	0,41g
Otimizado	1mL
Água	157,56mL

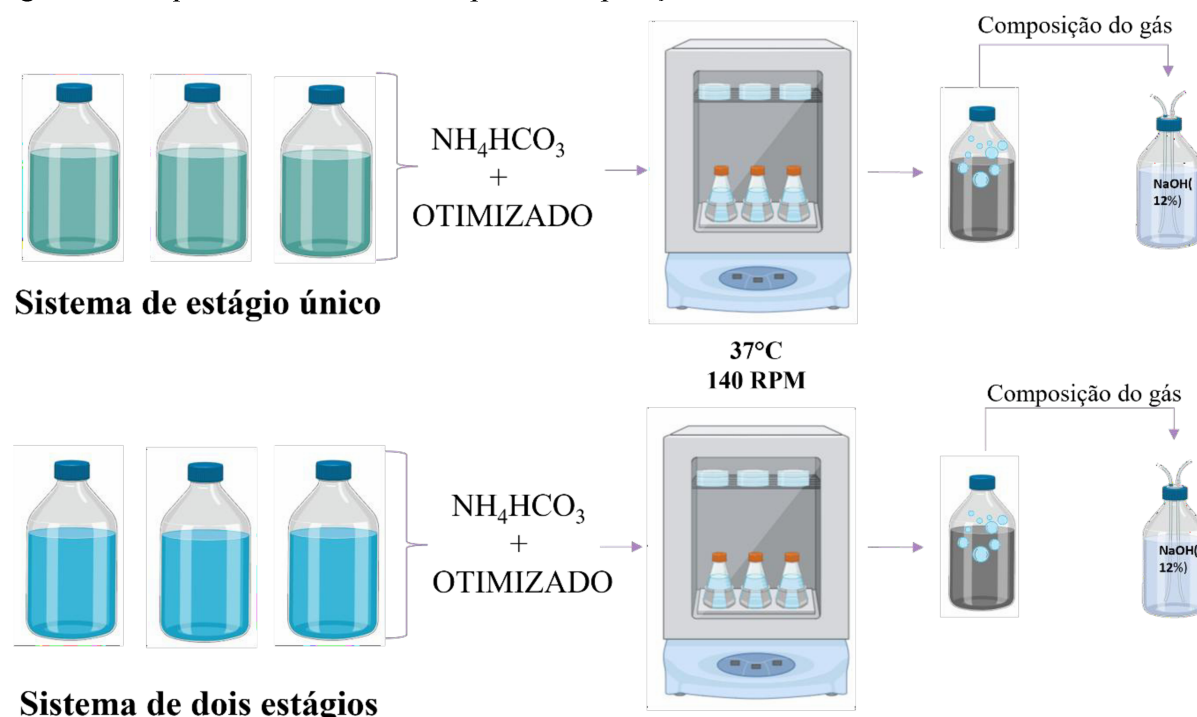
Fonte: Autor

4.7 Comparação - 3º fase

Na última fase, foi realizado um experimento comparativo entre bateladas alimentadas com RFV e bateladas com RFVA (Figura 4), simulando sistemas de um e dois estágios. Ambas seguiram as mesmas condições de operação e adotaram a metodologia previamente mencionada.

A composição de cada batelada está descrita nas Tabelas 15 e 16.

Figura 4 – Esquema ilustrativo da etapa de comparação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 15 – Composição das bateladas de um estágio.

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	13,70mL
RFVL	4,78mL
Bicarbonato de amônio	0,47g
Otimizado	1mL
Água	180,05mL

Fonte: Autor

Tabela 16 – Composição das bateladas de dois estágios

Componente	Massa/Volume
Lodo de cervejaria	13,70mL
RFVA	38,46mL
Bicarbonato de amônio	0,47g
Otimizado	1mL
Água	146,37mL

Fonte: Autor

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização do RFVL

Os resultados da caracterização do RFVL estão apresentados na Tabela 17. O valor obtido de 119 gDQO/L para o RFVL foi inferior ao encontrado por Menezes *et al.* (2024) reportaram uma DQO de 116 gDQO/L, enquanto Silva-Junior *et al.* (2022) registraram 138 gDQO/L, ambos utilizando a formulação proposta por Silva-Junior *et al.* (2022), a mesma empregada neste trabalho. Essa variação pode ser atribuída a fatores sazonais, que afetam diretamente a composição físico-química das frutas e verduras utilizadas, como teor de sólidos solúveis, açúcares, fibras e umidade, impactando consequentemente a composição do substrato.

Tabela 17 – DQO total, pH, acidez, sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do RFVL

Parâmetro	Valor	Unidade
DQO total	119	gDQO/L
pH	4,28	-
Acidez	899,4	mg/L
ST	94,17	%
SV	5,82	%

Fonte: Autor

5.2 Caracterização do RFVA

Os resultados da caracterização do RFVA estão na Tabela 18. O valor de 18,3 gDQO/L obtido para o RFVA apesar de baixo é esperada, uma vez que, o substrato é efluente de um reator que foi alimentado com RFV diluído. Durante a etapa acidogênica da DA no reator, ocorre a conversão da maior parte da matéria orgânica facilmente biodegradável, como açúcares e carboidratos simples, em gases (H_2 e CO_2) e AGVs. Como resultado, a concentração de matéria orgânica remanescente no efluente corresponde basicamente aos produtos intermediários formados, como pode ser visto na Tabela 19, os quais ainda contribuem para o valor de DQO, mas em concentrações significativamente menores em relação à matéria-prima original.

Tabela 18 – DQO total, pH, acidez, sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) do RFVA

Parâmetro	Valor	Unidade
DQO total	18,3	gDQO/L
pH	4,82	-
Acidez	438,8	mg/L
ST	64,86	%
SV	35,14	%

Fonte: Autor

Tabela 19 – Produtos intermediários do RFVA

Parâmetro	Valor	Unidade
AGVs	3407±117	mg/L
Ácido butírico	2921±489	mg/L
Ácido acético	1107±191	mg/L
Ácido isobutírico	642±107	mg/L
Ácido láctico	148±54	mg/L
Ácido propiônico	86±16	mg/L

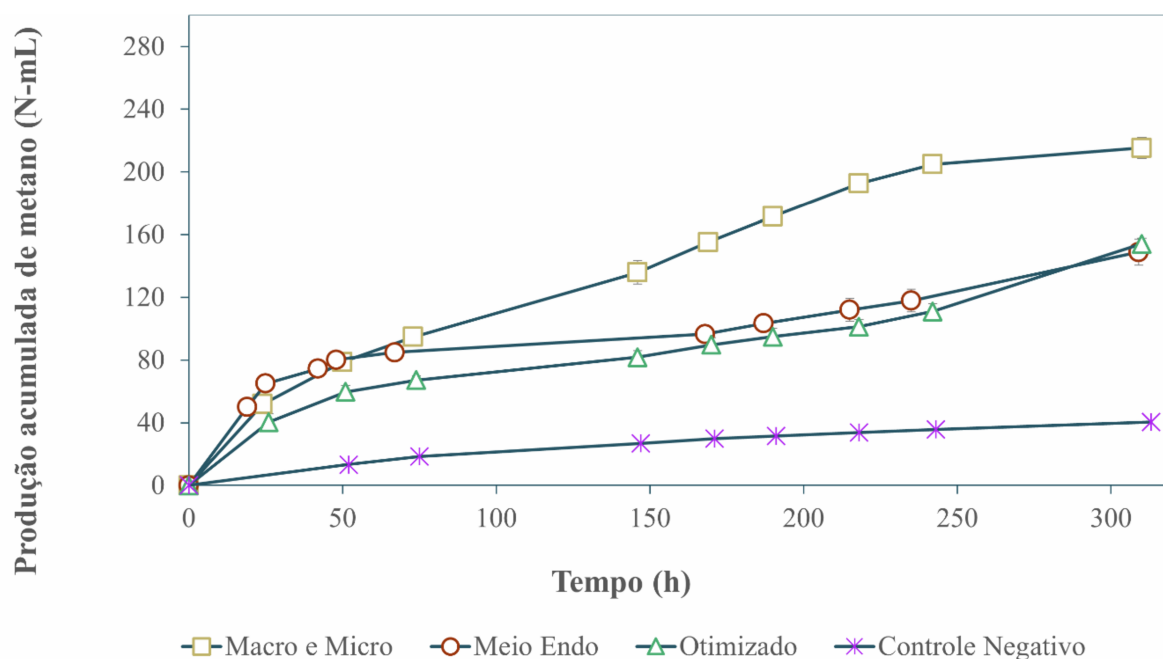
Autor: Adaptado de Silva-Júnior *et al.* (2025).

5.3 Bateladas – 1º fase

5.3.1 Efeito do meio nutricional

A Figura 5 mostra a produção acumulada de CH₄. Os resultados da primeira etapa foram avaliados quanto a produção acumulada de CH₄. O meio macronutrientes e micronutrientes teve uma média de 215 N-mL de produção acumulada de CH₄ durante os dias de operação, sobressaindo do meio endo e do otimizado que tiveram 169 N-mL e 154 N-mL, respectivamente.

Figura 5 – Produção acumulada de metano a partir do efeito do nutriente.



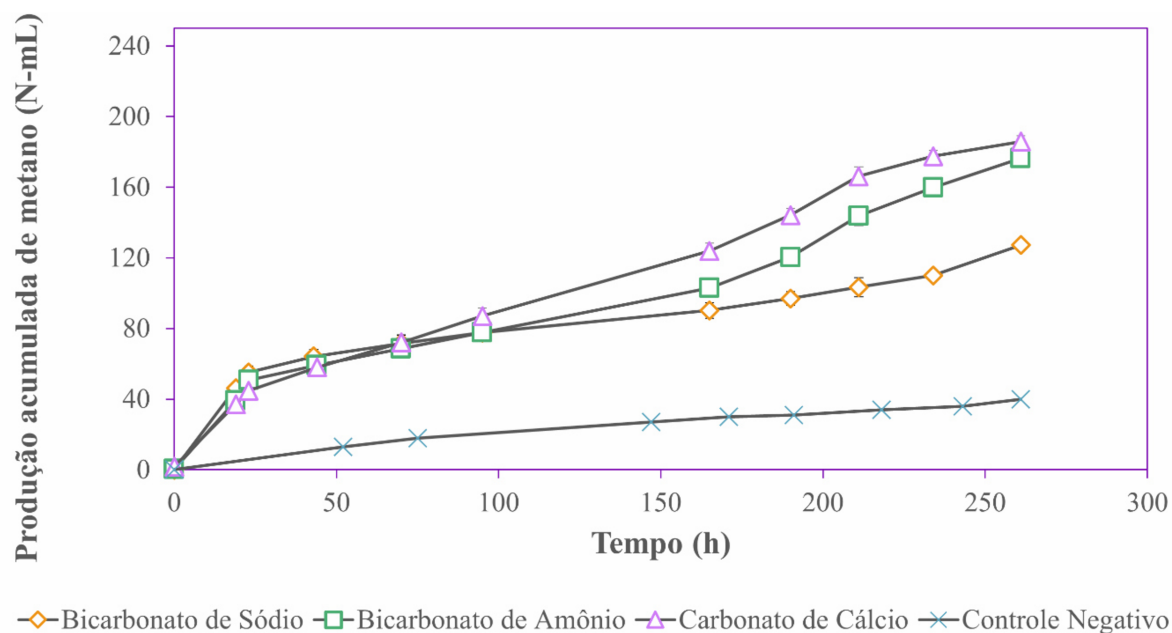
Fonte: Autor.

Choong *et al.* (2016) destacam que Fe, Co e Ni são os principais oligoelementos necessários para o bom desempenho da DA, sendo que sua suplementação adequada pode potencializar o processo. Complementarmente, Jiang *et al.* (2012) explicam que a presença de metais como Co, Ni, Fe, Zn, Mo e W está diretamente relacionada à atuação desses elementos como cofatores e coenzimas envolvidas nas reações bioquímicas anaeróbias. Assim, a maior produção acumulada de CH_4 observada nas bateladas que utilizaram o meio contendo macronutrientes e micronutrientes pode ser atribuída à presença e disponibilidade desses oligoelementos, que favoreceram a atividade enzimática e o equilíbrio das etapas do processo, especialmente na fase metanogênica, otimizando a conversão da matéria orgânica em biogás.

5.3.2 Análise de alcalinizantes

O resultado da segunda etapa está na Figura 6. O CaCO_3 , utilizado como agente alcalinizante, apresentou uma média de produção acumulada de 186 N-mL de CH_4 , superando os valores obtidos com NaHCO_3 (127 N-mL) e NH_4HCO_3 (176 N-mL).

Figura 6 – Produção acumulada de metano a partir do efeito do alcalinizante.



Fonte: Autor

Este resultado sugere que o CaCO_3 foi mais eficiente em manter condições favoráveis à metanogênese, provavelmente por proporcionar maior estabilidade ao pH e maior tamponamento dos AGVs ao longo da digestão. A literatura fornece algumas explicações que ajudam a compreender esse comportamento. Li *et al.* (2019) utilizou NH_4HCO_3 como fonte de alcalinidade, com o objetivo de fornecer capacidade tamponante e aumentar a relação entre alcalinidade de bicarbonato e AT. No entanto, foi observado um acúmulo severo de AGVs, indicando que a taxa de acidogênese superou a taxa de metanogênese. Como consequência, o sistema tornou-se instável, principalmente em altas cargas orgânicas (4,0 g VS/(L·d)), e a adição contínua de NH_4HCO_3 não conseguiu reverter essa instabilidade.

De forma semelhante, Jiang *et al.* (2012) avaliaram a suplementação com NH_4HCO_3 associado a NaHCO_3 , e com NaHCO_3 isoladamente. Os autores observaram que tais combinações não promoveram benefícios sustentáveis: o pH e a produção de biogás continuaram a decrescer, evidenciando que o efeito tamponante não foi suficiente para conter a acidificação progressiva do sistema.

No presente estudo, a superioridade do CaCO_3 pode ser atribuída à sua maior capacidade de tamponamento prolongado e à sua baixa solubilidade, que proporciona uma liberação gradual de íons carbonato (CO_3^{2-}) e cálcio (Ca^{2+}) (Chen *et al.*, 2015). Essa liberação controlada

é vantajosa, pois amortece variações bruscas de pH e assegura um ambiente mais estável para as populações metanogênicas, mesmo diante de variações na carga orgânica ou na geração de AGVs.

Esse comportamento é corroborado por Chen *et al.* (2015), que testaram diferentes fontes de alcalinidade na digestão de resíduos alimentares. O CaCO_3 apresentou aumento de aproximadamente 30% na produção de CH_4 , em comparação ao NaHCO_3 , além de promover maior alcalinidade residual e menor acidez final em comparação ao sistema controle sem alcalinizante. Esses resultados reforçam a ideia de que o CaCO_3 atua de forma eficaz como tampão alcalino, promovendo maior estabilidade operacional e eficiência na DA de substratos suscetíveis à acidificação, como frutas e verduras (Chen *et al.*, 2015).

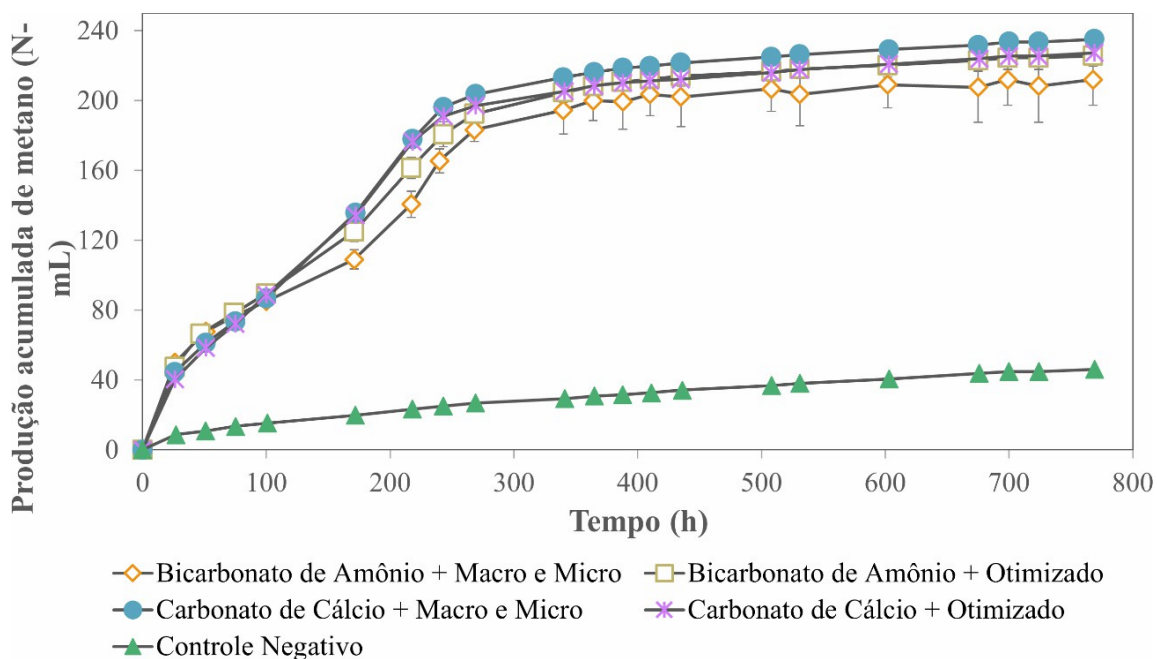
5.3.3 Combinação

Os resultados da última etapa utilizando RFVL estão na Figura 4. A combinação entre o meio contendo macronutrientes e micronutrientes e o CaCO_3 como agente alcalinizante resultou em uma produção média de CH_4 acumulado de 235 N-mL e uma atividade metanogênica específica (AME) de 0,039 N-mL CH_4 mg^{-1} SV adicionados, desempenho superior às demais configurações testadas, como NH_4HCO_3 com macro e micro (212 N-mL), CaCO_3 com meio otimizado (227 N-mL) e NH_4HCO_3 com meio otimizado (226 N-mL).

A presença de micronutrientes essenciais, como Fe, Co e Ni, provavelmente favoreceu a atividade das enzimas envolvidas na metanogênese, enquanto o CaCO_3 contribuiu para a estabilidade do pH, graças à sua liberação gradual de íons. Dessa forma, supõe-se que, a combinação de fatores como a suplementação nutricional adequada e o controle eficiente do ambiente reacional parece ter criado condições ideais para a produção de biogás, evidenciando um efeito complementar entre a suplementação de nutrientes e o tamponamento do sistema.

Hua *et al.* (2024) relataram que a aplicação de estratégias combinadas com oligoelementos e tamponantes foi eficaz para conter a acidificação e melhoraram o rendimento de CH_4 em digestores alimentados com resíduos de cozinha.

Figura 7 – Produção acumulada de metano do planejamento com RFVL.



Fonte: Autor

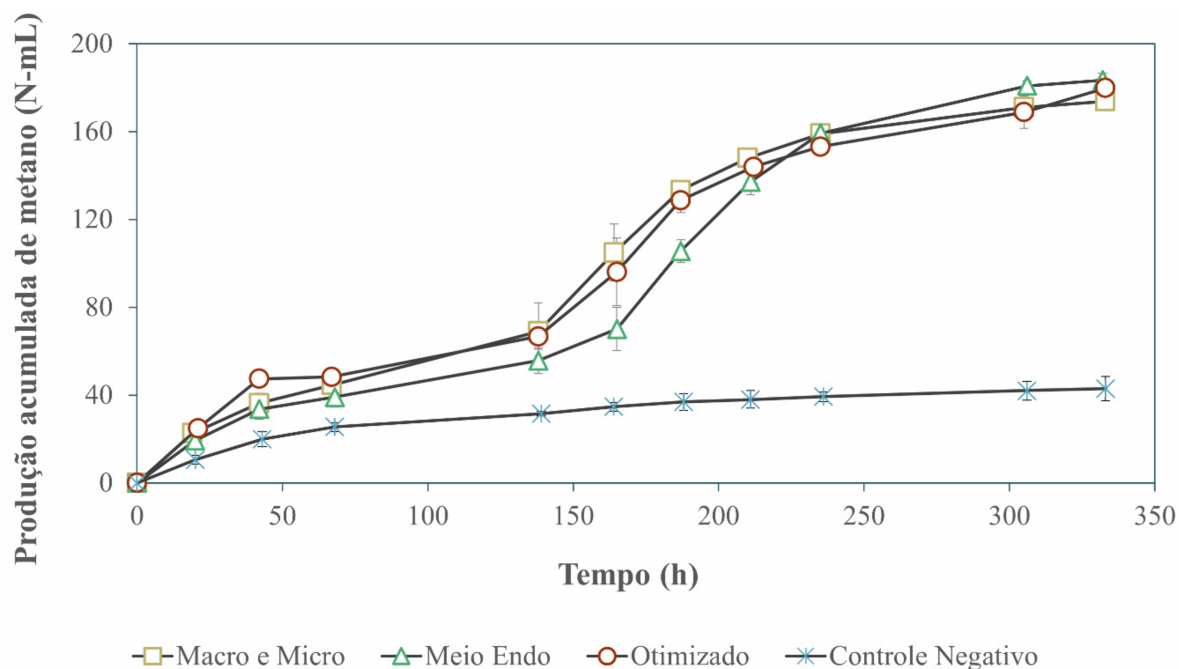
5.4 Bateladas – 2º fase

5.4.1 Efeito do meio nutricional

Os resultados da primeira etapa utilizando RFVA estão na Figura 5. O meio otimizado apresentou uma produção acumulada de CH_4 de 180 N-mL e uma AME de 0,037 N-mL $\text{CH}_4 \text{ mg}^{-1} \text{SV}$, similar ao meio endo (183 N-mL e AME de 0,036) e ao meio macronutrientes e micronutrientes (174 N-mL e AME de 0,034).

Esses resultados indicam que, em substratos já acidificados com acúmulo prévio de AGVs e possível comprometimento do equilíbrio nutricional, uma suplementação direcionada e proporcional à carência nutricional do meio pode ser mais eficaz do que o fornecimento de nutrientes em excesso ou em formulações genéricas, o que pode reduzir o custo do processo.

Figura 8 – Produção acumulada de metano a partir do efeito do nutriente com RFVA



Fonte: Autor

5.4.2 Análise de alcalinizantes

Os resultados da análise de alcalinizantes utilizando o RFVA estão na Figura 6. O NH_4HCO_3 apresentou a maior eficiência metanogênica entre os alcalinizantes testados, com produção acumulada de 194 N-mL CH_4 e AME de 0,048 N-mL $\text{CH}_4 \text{ mg}^{-1}$, superando tanto o NaHCO_3 (161 N-mL) quanto o CaCO_3 (182 N-mL).

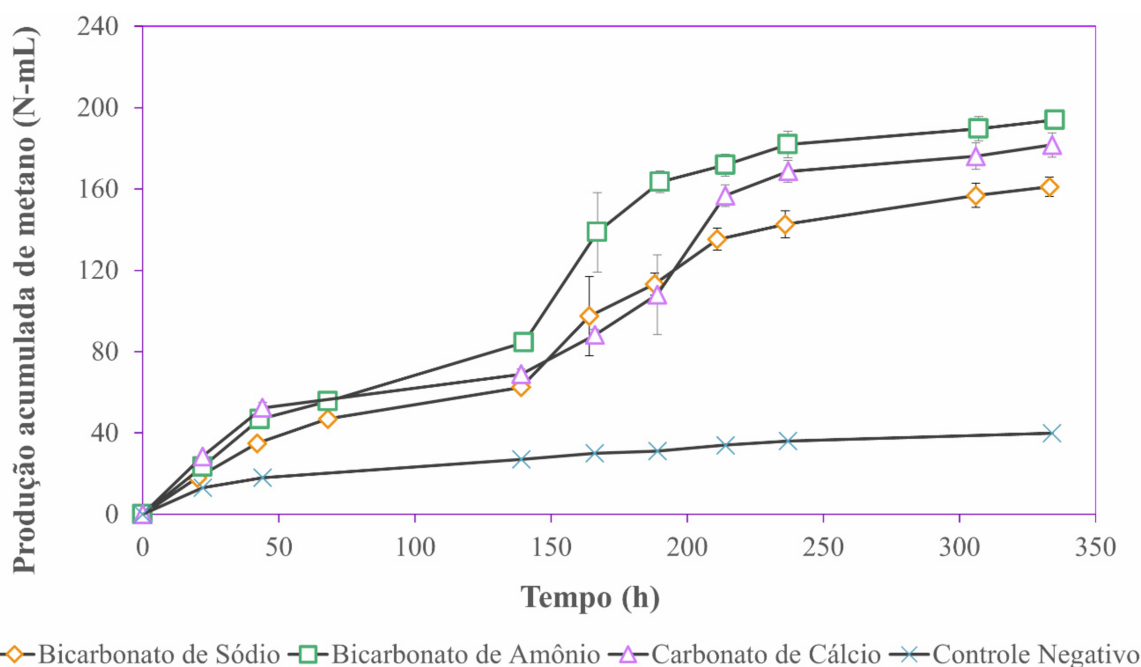
Esses resultados estão alinhados com as evidências reportadas por Hao *et al.* (2022), que demonstraram o papel do NH_4HCO_3 na recuperação da metanogênese em DA de resíduos com baixa C/N. O substrato utilizado no experimento (RFV) apresentava originalmente uma C/N de 7,61, (Silva-Junior *et al.*, 2024) considerada significativamente baixa, e que tende a se reduzir ainda mais após o processo de acidificação, aumentando o risco de inibição por NH_3 e acúmulo de AGVs.

O efeito superior do NH_4HCO_3 pode ser atribuído à sua capacidade de reativar a oxidação de AGVs, frequentemente acumulados em substratos acidificados, e de estabelecer um sistema tampão dinâmico entre íons bicarbonato e amônio ($\text{HCO}_3^- / \text{NH}_4^+$), mantendo o pH dentro da faixa ideal para atividade metanogênica (6,8–7,5). Além disso, o estudo mencionado, de Hao *et al.* (2022), destaca que esse tampão químico favorece a dominância de arqueias

metanogênicas acetoclásticas, como *Methanosaeta*, o que possivelmente contribuiu para a maior conversão de acetato em CH_4 observada nos tratamentos com NH_4HCO_3 .

A performance inferior dos outros alcalinizantes pode ser explicada, no caso do NaHCO_3 , por sua limitação em fornecer nitrogênio assimilável e formar um sistema tampão complementar como o $\text{HCO}_3^-/\text{NH}_4^+$, enquanto no caso do CaCO_3 , a baixa solubilidade e reatividade comprometeram sua eficácia. Assim, o NH_4HCO_3 se destacou como a opção mais eficaz para estabilizar o processo e maximizar a produção de CH_4 em resíduos orgânicos com excesso de N e acidificação.

Figura 9 – Produção acumulada de metano a partir do efeito de alcalinizantes com RFVA.



Fonte: Autor

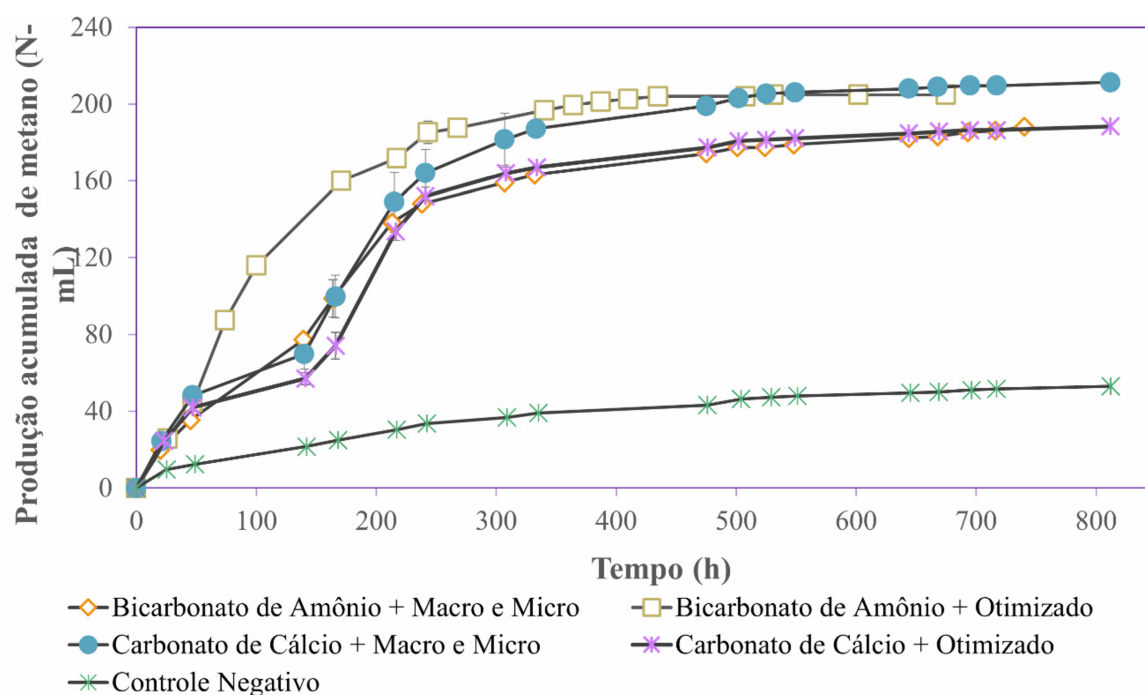
5.4.3 Combinação

Na Figura 7 estão expostos os resultados da fase de planejamento utilizando o RFVA. A combinação de CaCO_3 com macronutrientes e micronutrientes resultou na maior produção acumulada de CH_4 observada no experimento, atingindo 211 N mL, com um AME de 0,029 N mL CH_4 mg^{-1} . Esse resultado superou as combinações do NH_4HCO_3 , tanto com o mesmo meio nutricional (188 N mL) quanto com o meio otimizado (205 N mL), além da combinação CaCO_3 + meio otimizado (188 N mL).

Este resultado reforça a conclusão de que a sinergia entre um agente alcalinizante de liberação gradual, como o CaCO_3 , e a suplementação adequada de micronutrientes é a estratégia mais eficaz para estabilizar o ambiente reacional e potencializar a atividade metanogênica em substratos acidificados.

Assim como discutido anteriormente, a literatura (Choong *et al.*, 2016; Romero-Guiza *et al.*, 2016; Menon *et al.*, 2017) corrobora a importância dos oligoelementos na manutenção da atividade microbiológica e na melhoria da conversão de AGVs. Dessa forma, este resultado não apenas confirma os dados já discutidos, mas reforça a robustez dessa combinação como estratégia consolidada para otimização da produção de CH_4 em RFVA.

Figura 10 – Produção acumulada de metano do planejamento com RFVA



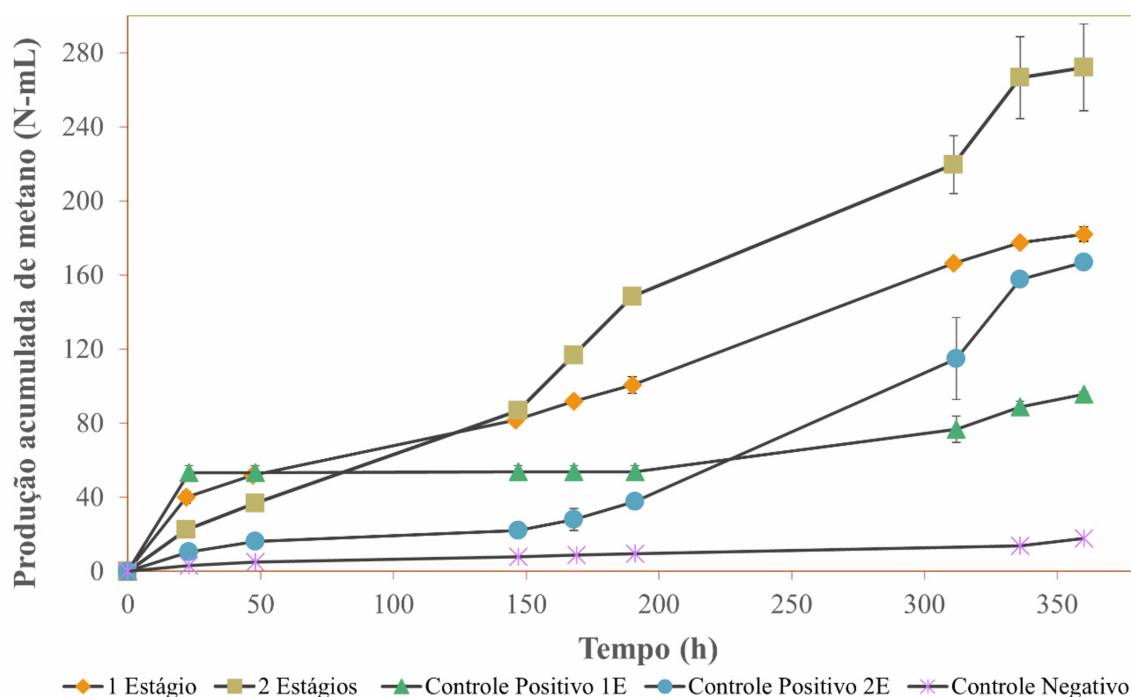
Fonte: Autor

5.5 Bateladas – 3º fase

Os resultados da fase de comparação do sistema de um estágio e de dois estágios estão na Figura 8. O sistema de estágio único apresentou 182 N mL de CH_4 acumulado e AME de 0,029, enquanto o sistema de dois estágios registrou expressiva produção de 272 N mL e AME de 0,053. Esse ganho substancial em desempenho confirma a literatura, onde sistemas em dois estágios frequentemente superam os de estágio único devido à separação das fases de

acidificação e metanogênese, permitindo controle de AGVs e melhor ambiente microbiológico (Parra-Orobio *et al.*, 2021). Por exemplo, Hou *et al.* (2021) relataram que sistemas em dois estágios apresentaram maiores taxas de remoção de SV e maior produção de CH_4 em resíduos alimentares. Além disso, Martínez-Mendoza *et al.* (2024) registraram um aumento de aproximadamente 33 % na produtividade de CH_4 em processos de dois estágios comparados aos de estágio único. A diferença se deve ao fato de que o primeiro estágio acidogênico permite a produção e remoção controlada de AGVs e potencial produção de H_2 , enquanto o segundo estágio foca na conversão eficiente desses intermediários em CH_4 .

Figura 11 – Produção acumulada de metano na comparação de sistema de um e dois estágios



Fonte: Autor

Para esta etapa, foi utilizado o meio otimizado como solução nutricional, selecionado por apresentar perfil nutricional adequado com menor custo, contribuindo para a viabilidade econômica do processo. O agente alcalinizante adotado foi o NH_4HCO_3 escolhido por ser economicamente mais viável e não ter apresentado diferenças significativas de desempenho em relação ao CaCO_3 . Somando o uso de NH_4HCO_3 com meio otimizado, que promove tamponamento eficaz e fornecimento nutricional completo, o sistema de dois estágios demonstrou maior estabilidade operacional e melhoria significativa no rendimento energético, especialmente relevante em substratos ricos em açúcares e com tendência a acidificação. Isso confirma o potencial dessa configuração para melhorar a conversão energética de resíduos

orgânicos, especialmente quando associada a estratégias combinadas de tamponamento e suplementação nutricional.

6 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou estratégias para maximizar a produção de CH_4 a partir do RFVL, considerando diferentes meios nutricionais, agentes alcalinizantes e configurações de reatores, por meio de ensaios em bateladas.

Os resultados indicaram que:

- Entre os meios nutricionais testados, a formulação contendo macro e micronutrientes apresentou o melhor desempenho para o RFVL, evidenciando a importância de elementos-traço como Fe, Co e Ni na atividade metanogênica.
- Quanto aos agentes alcalinizantes, tanto o CaCO_3 quanto o NH_4HCO_3 apresentaram desempenhos próximos, sendo este último escolhido para a etapa de comparação por sua viabilidade econômica e por não apresentar diferenças significativas em relação ao CaCO_3 .
- Na etapa final, a combinação do meio otimizado, com o NH_4HCO_3 promoveu tamponamento eficaz, fornecimento nutricional completo e resultou em maior estabilidade operacional.
- O sistema de dois estágios, utilizando essa combinação, apresentou incremento próximo a 50% na produção de metano em comparação ao sistema de um estágio, especialmente relevante para substratos ricos em açúcares e suscetíveis à acidificação.

Em síntese, a otimização integrada do ambiente químico (alcalinidade) e bioquímico (nutrientes) mostrou-se determinante para o desempenho da digestão anaeróbia, aliando eficiência técnica e viabilidade econômica. Recomenda-se que as condições identificadas sejam validadas em reatores contínuos, de forma a confirmar a estabilidade e a aplicabilidade em escala operacional, contribuindo para o avanço do aproveitamento energético de resíduos orgânicos.

REFERÊNCIAS

ADEKUNLE, K.; OKOLIE, J. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, p. 205–212, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>.

AGRAWAL, Akanksha; CHAUDHARI, Parmesh Kumar; GHOSH, Prabir. Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: a critical review of associated challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.l.], v. 30, p. 24987–25012, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21643-7>.

ALENGEBAWY, Ahmed; RAN, Yi; OSMAN, Ahmed I.; JIN, Keda; SAMER, Mohamed; AI, Ping. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22, n. 6, p. 2641–2668, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>.

ALKANOK, Gizem; DEMIREL, Burak; ONAY, Turgut T. Determination of biogas generation potential as a renewable energy source from supermarket wastes. **Waste Management**, [S.l.], v. 34, n. 1, p. 134–140, jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.09.015>.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21. ed. Washington, DC: APHA, 2005.
APPELS, L. *et al.*, Principles and potential of the anaerobic digestion of waste activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S.l.], v. 34, n. 6, p. 755–781, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>.

ARHOUN, Brahim *et al.* Anaerobic co digestion of mixed sewage sludge and fruits and vegetable wholesale market waste: composition and seasonality effect. **Journal of Water Process Engineering**, [S.l.], v. 31, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100848>.

BOUALLAGUI, H.; TORRIJOS, M.; GODON, J. J.; MOLETTA, R.; BEN CHEIKH, R.; TOUHAMI, Y.; DELGENES, J. P.; HAMDI, M. Two phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactor performance. **Biochemical Engineering Journal**, [S.l.], v. 21, n. 2, p. 193–197, out. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2004.05.001>.

BOLZONELLA, D. *et al.* Anaerobic digestion of organic solid wastes: Process behaviour in transient conditions. **Water Research**, v. 40, n. 17, p. 3290–3296, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.022>.

CAVALCANTE, Willame de Araújo. **Avaliação de processos sintróficos avançados na digestão anaeróbia de resíduos ricos em carboidratos sob diferentes condições de estresse operacionais**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAVALEIRO, A. J.; ALVES, M. M. Digestão anaeróbia. **Revista Ciência Elementar**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 009, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24927/rce2020.009>.

CHEN, S.; ZHANG, J.; WANG, X. Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. **Waste Management & Research**, [S.l.], v. 33, n. 11, p. 1033–1040, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242x15602965>.

CLIMENHAGA, M. A.; BANKS, C. J. Anaerobic digestion of catering wastes: effect of micronutrients and retention time. **Water Science and Technology**, [S.l.], 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2008.092>.

CHOONG, Yee Yaw; NORLI, Ismail; ABDULLAH, Ahmad Zuhairi; YHAYA, Mohd Firdaus. Impacts of trace element supplementation on the performance of anaerobic digestion process: a critical review. **Bioresource Technology**, [S.l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.028>.

DEMIRCI, G. G.; DEMIRER, G. N. Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 93, n. 1, p. 109–117, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.019>.

DEMIRER, G. N.; CHEN, S. Two-phase thermophilic acidification and mesophilic methanogenesis anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Environmental Engineering Science*, [S.l.], v. 25, n. 6, p. 831–840, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1089/ees.2007.0242>

EDWIGES, T. *et al.*, Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, [S.l.], v. 71, p. 618–625, jan. 2018. DISPONÍVEL EM: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.030>.

ENDO, G.; NOIKE, T.; MATSUMOTO, J. Characteristics of cellulose and glucose decomposition in anaerobic phase of anaerobic digestion. **Proceedings, Society of Civil Engineers**, v. 325, p. 61–68, 1982. Disponível em: https://doi.org/10.2208/jscej1969.1982.325_61.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Food wastage footprint: impacts on natural resources**. Rome: FAO, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses**. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb4476en>.

FONGSATITKUL, P.; ELEFSINIOTIS, P.; WAREHAM, D. G. Two-phase anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: estimation of methane production. **Waste Management & Research**, [S.l.], v. 30, n. 7, p. 720–726, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X11429987>.

HAO, Tianwei; XIAO, Yihang; VARJANI, Sunita. Transiting from the inhibited steady-state to the steady-state through the ammonium bicarbonate mediation in the anaerobic digestion of

low-C/N-ratio food wastes. **Bioresource Technology**, v. 360, 127046, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127046>.

HOU, T. *et al.* Enhanced energy recovery via separate hydrogen and methane production from two-stage anaerobic digestion of food waste with nanobubble water supplementation. **Science of The Total Environment**, [S.l.], v. 761, p. 143234, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143234>

HUA, D.; YUAN, S.; ZHAO, Y.; XU, H.; CHEN, L.; JIN, F.; LI, Y. Effects of different acidification-resisting strategies on anaerobic digestion of kitchen waste: Methanogenic properties and microbial community shift. **BioResources**, v. 19, n. 2, p. 2480–2502, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.19.2.2480-2502>.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 2021.

JIANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS, C. J. Strategies for performance and stability improvement in mesophilic anaerobic digestion of vegetable waste. In: INTERNATIONAL IWA SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION OF SOLID WASTE AND ENERGY CROPS, **9.**, 2011, Viena. *Anais* Viena: IWA, 2011. Disponível em: <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/350161>.

JIANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS, C. J. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 44, p. 206–214, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.012>.

KAYHANIAN, M.; RICH, D. Pilot scale high solids thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements. **Biomass & Bioenergy**, [S.l.], v. 8, n. 6, p. 433–444, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00043-7).

KIM, J.; PARK, C.; KIM, T. H.; LEE, M.; KIM, S.; KIM, S. W.; LEE, J. Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, [S.l.], v. 95, n. 3, p. 271–275, 2003a. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)80028-2](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)80028-2).

KIM, M.; GOMEZ, C. Y.; AHN, Y.; SPEECE, R. E. Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. **Environmental Technology**, [S.l.], v. 24, n. 9, p. 1183–1190, 2003b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330309385659>.

KONDUSAMY, Dhamodharan; KALAMDHAD, Ajay S. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 152, p. 219–228, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.121>.

LANE, A. G. Laboratory scale anaerobic digestion of fruit and vegetable solid waste. **Biomass**, [S.l.], v. 5, p. 245–259, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(84\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0144-4565(84)90072-6).

LI, Dong; SUN, Juan; CAO, Qin; CHEN, Yichao; LIU, Xiaofeng; RAN, Yi. Recovery of unstable digestion of vegetable waste by adding trace elements using the bicarbonate alkalinity to total alkalinity ratio as an early warning indicator. **Biodegradation**, [S.l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10532-019-09868-9>.

LINDORFER, H.; PÉREZ LÓPEZ, C.; RESCH, C.; BRAUN, R.; KIRCHMAYR, R. The impact of increasing energy crop addition on process performance and residual methane potential in anaerobic digestion. **Water Science and Technology**, [S.l.], v. 56, n. 10, p. 55–63, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2007.728>.

MA, J. et al. Maximum removal rate of propionic acid as a sole carbon source in UASB reactors and the importance of the macro and micronutrients stimulation. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 100, n. 14, p. 3477–3482, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.060>.

MACHMUD, Alamsyah; LUBIS, Muhammad R.; HIDAYAT, Wahyu. Biogas as a sustainable fuel and feedstock: properties, purification, and applications. **Biogas**. London: IntechOpen, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.114268>.

MARTÍNEZ MENDOZA, Leonardo José; MUÑOZ, Raúl; GARCÍA DEPRÆCT, Octavio. Enhanced methane production from food waste: a systematic comparison between conventional single-stage and lactate-based two-stage anaerobic digestion processes. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v. 188, art. 107312, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107312>.

MENEZES, Camila Aparecida de; DUARTE, Máira Saldanha; TEIXEIRA, Isabelle Nascimento; CAVALCANTE, Willame de Araújo; ALMEIDA, Priscilla de Souza; VIANA, Michael Barbosa; ZAIAT, Marcelo; LEITÃO, Renato Carrhá. Uso de resíduos de frutas e verduras para gerar hidrogênio por meio da fermentação escura. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 29, p. e20240013, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220240013>.

MENEZES, Camila Aparecida de. **Produção de hidrogênio e compostos de valor agregado em reatores de leito granular expandido mesofílicos a partir do caldo de cana de açúcar**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MENON, Ajay; WANG, Jing-Yuan; GIANNIS, Apostolos. Optimization of micronutrient supplement for enhancing biogas production from food waste in two-phase thermophilic anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 59, p. 465–475, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.017>.

MERTINS, Anica; WAWER, Tim. How to use biogas? A systematic review of biogas utilization pathways and business models. **Bioresources and Bioprocessing**, [S.l.], v. 9, art. 59, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00545-z>.

MORALES-POLO, Carlos; CLEDERA-CASTRO, María del Mar; HUESO-KORTEKAAS, Katia; REVUELTA-ARAMBURU, Marta. Anaerobic digestion in wastewater reactors of separated organic fractions from wholesale markets waste: compositional and batch characterization. Energy and environmental feasibility. **Science of the Total Environment**,

[S.l.], v. 729, p. 138567, 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138567>.

NANDA, Sanil *et al.* Gasification of fruit wastes and agrofood residues in supercritical water, **Energy Convers. Manag.** v. 110, p. 296–306, fev. 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.060>

PARRA OROBIO, Brayan Alexis; CRUZ BOURNAZOU, Mariano Nicolás; TORRES LOZADA, Patricia. Single Stage and Two Stage Anaerobic Digestion of Food Waste: Effect of the Organic Loading Rate on the Methane Production and Volatile Fatty Acids. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, art. 105, mar. 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05064-9>.

RAPOSO, F. *et al.*, Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, [S.l.], v. 86, n. 8, p. 1088–1098, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.2622>

ROMERO GÜIZA, M. S.; VILA, J.; MATA ÁLVAREZ, J.; CHIMENOS, J. M.; ASTALS, S. The role of additives on anaerobic digestion: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>.

RUBIO-LOZA, L. A.; NOYOLA, A. Two-phase anaerobic digestion of municipal sludge: operational performance and biosolids characterization. *Bioresource Technology*, [S.l.], v. 101, n. 1, p. 170–177, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.066>

SILVA JÚNIOR, Francisco das Chagas Gomes da; MENEZES, Camila Aparecida de; CAVALCANTE, Willame Araújo; ARAGÃO, Oscar Pedreira; ZAIAT, Marcelo; LEITÃO, Renato Carrhá. Characterization of fruits and vegetables waste generated at a central horticultural wholesaler: a case study for energy production via biogas. **Industrial Biotechnology**, [S.l.], v. 18, n. 4, p. 235–239, 1 ago. 2022. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1089/ind.2021.0032>.

SILVA JÚNIOR, Francisco das Chagas Gomes da; ALMEIDA, Priscilla de Souza; MENEZES, Camila Aparecida de; DUARTE, Máira Saldanha; SILVA, Thobias Pereira; SANTOS, André Bezerra dos; ZAIAT, Marcelo; LEITÃO, Renato Carrhá. Anaerobic digestion of the liquid fraction of fruit and vegetable waste: two-stage versus single-stage process. **ACS Omega, Washington**, v. 10, n. 9, p. 5686–5694, 2025. Disponível em:
<https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00073>.

SOARES DAMASCENO, Leonardo H. *et al.* Efeito da alcalinidade a bicarbonato sobre a análise gravimétrica de sólidos em tratamento anaeróbico de águas residuárias. **Ingeniería del Agua**, [S.l.], v. 32, n. 9, p. 610–614, set. 2007. ISSN 0378 1844. Disponível em:
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000900008&lng=es&nrm=iso

TRUJILLO-REYES, Ángeles; CUÉLLAR, Sofia G.; JEISON, David; SERRANO, Antonio; ZAHEDI, Soraya; FERMOSO, Fernando G. Anaerobic digestion of organic solid waste: challenges derived from changes in the feedstock. In: **INTECHOPEN. Anaerobic Digestion**

in *Bioreactor Landfills and Biogas Purification*. London: IntechOpen, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.107121>.

UFVJM – UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI. Redução de perdas e desperdício de alimentos na cadeia produtiva de hortifrúteis. 2023. Disponível em: <https://siexc.ufvjm.edu.br/projetos/738>.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019: Highlights**. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. Disponível em: <https://www.un.org/pt/desa/world-population-prospects-2019-highlights>. Acesso em: 27 jun. 2025.

VALENÇA, Rebeca Beltrão; SANTOS, Liliana Andréa dos; FIRMO, Alessandra Lee Barbosa; SILVA, Leandro César Santos da; LUCENA, Talita Vasconcelos de; SANTOS, André Felipe de Melo Sales; JUCÁ, José Fernando Thomé. *Influence of sodium bicarbonate (NaHCO₃) on the methane generation potential of organic food waste*. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 294, p. 128390, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128390>.

VALENTIN, Marvin T.; BIAŁOWIEC, Andrzej. Impact of using glucose as a sole carbon source to analyze the effect of biochar on the kinetics of biomethane production. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 8656, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59313-y>.

WALKER, M.; ZHANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS, C. J. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. **Bioresource Technology**, Oxford, v. 100, n. 24, p. 6339–6346, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.018>

WANG, Xiaojiao; LU, Xingang; LI, Fang; YANG, Gaihe. 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, n. 5, e97265, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097265>

WARD, Alastair J.; HOBBS, Phil J.; HOLLIMAN, Peter J.; JONES, David L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 1 nov. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>

XU, Feng; LI, Yong; GE, Xiuguo; YANG, Liang; LI, Ying. Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1047–1058, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>.

YANG, X. *et al.* Fe O enhanced efficiency of volatile fatty acids production in anaerobic fermentation of food waste at high loading. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 363, p. 127989, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128097>

YU, H.-Q.; FANG, H. H. P. Acidogenesis of dairy wastewater at various pH levels. **Water Science and Technology**, United Kingdom, v. 45, n. 10, p. 201–206, maio 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0331>.

ZHU, Huguang; STADNYK, Aaron; BÉLAND, Michel; SETO, Peter. Co-production of hydrogen and methane from potato waste using a two-stage anaerobic digestion process. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 99, n. 8, p. 5078–5084, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.083>
