

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

GABRYEL PONTES LIMA

**Avaliação experimental da produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas
(*Eichhornia crassipes*) oriundas do Baixo São Francisco**

Maceió
2025

GABRYEL PONTES LIMA

**Avaliação experimental da produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas
(*Eichhornia crassipes*) oriundas do Baixo São Francisco**

Tese apresentada à Universidade Federal de Alagoas, como requisito para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Maceió
2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

L732a Lima, Gabryel Pontes.

Avaliação experimental da produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipes*) oriundas do Baixo São Francisco / Gabryel Pontes Lima. – 2025.

89 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de pós-Graduação em Engenharia Química. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 78-85.

Apêndices: f. 86-89.

1. Biogás. 2. Biomassa. 3. Digestão anaeróbia. I. Título.

CDU: 662.767.2

Gabryel Pontes Lima

**Avaliação experimental da produção de biometano a partir de
macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipes*) oriundas do Baixo
São Francisco**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Alagoas, como requisito
para a obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Química.

Aprovada em: Maceió, 28 de fevereiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO LUCENA CAVALCANTE DE AMORIM**
Data: 06/03/2025 17:44:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim (Orientador – PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **RENATA MARIA ROSAS GARCIA ALMEIDA**
Data: 07/03/2025 09:30:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a Renata Maria Rosas Garcia Almeida (PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **VANIA DE LOURDES DAS GRACAS TELES**
Data: 07/03/2025 13:06:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Vânia de Lourdes Das Graças Teles (PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **DAYANA DE GUSMAO COELHO**
Data: 07/03/2025 18:57:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Dayana de Gusmão Coelho (CTEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDA SANTANA PEITER**
Data: 08/03/2025 05:57:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Fernanda Santana Peiter (UFAL)

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por me guiar em cada passo desta jornada, fortalecendo-me nos momentos de desafio e iluminando meu caminho com sabedoria e perseverança.

Aos meus **pais, José Eudes e Rita de Cássia**, que, com amor incondicional, dedicação e sacrifício, me proporcionaram todas as condições para que eu pudesse ingressar no curso de Engenharia Química na Universidade Federal de Alagoas. Obrigado pela atenção, carinho, companheirismo e pelos valores que me ensinaram. Tudo o que sou e conquistei devo a vocês. Esta vitória também é de vocês.

Ao meu **irmão, Matheus**, companheiro de jornada e de aprendizado, com quem sempre pude compartilhar conhecimentos e contar em todos os momentos. Sua presença e apoio foram essenciais nesta caminhada.

Ao meu **orientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena de Amorim**, pelos ensinamentos, paciência, compreensão e, sobretudo, pela confiança em abrir as portas do Laboratório de Controle Ambiental para o desenvolvimento desta tese. Seu apoio foi fundamental para que eu conseguisse superar desafios e concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos **familiares e amigos**, pelo incentivo, apoio e palavras de encorajamento ao longo de toda essa trajetória. Cada demonstração de carinho e motivação foi um combustível essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos **membros das bancas** qualificação e defesa da tese, **Prof.^a Dr.^a Dayana Coelho, Prof.^a Dr.^a Fernanda Peiter, Prof.^a Dr.^a Renata Maria Almeida e Prof.^a Dr.^a Vânia de Lourdes Teles**, pelas valiosas contribuições, sugestões e conhecimentos compartilhados.

Ao **corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas**, pela dedicação e excelência no ensino, que tanto contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** pelo apoio financeiro, essencial para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, minha eterna gratidão.

Instantes não vividos são como areia na ampulheta
que o tempo leva embora e não volta mais.
Nenhuma chance perdida vale a pena.

Patricia Fonseca, Coração de Atleta:

Renascendo na mesma vida.

(FONSECA, 2023)

RESUMO

A proliferação exacerbada de macrófitas aquáticas na região do Baixo São Francisco tem ensejado uma série de implicações adversas tanto para a economia local quanto para o ecossistema marinho circunvizinho. Estes desdobramentos negativos abarcam, entre outros aspectos, a redução na atividade pesqueira, indicação de contaminação por coliformes termotolerantes, diminuição nos níveis de oxigênio dissolvido na água e a perda significativa de biodiversidade. Neste contexto, abordagens fundamentadas em processos de natureza química, enzimática e biotecnológica emergem como possíveis estratégias para mitigar o impacto dessas macrófitas e promover a conversão de seus resíduos em produtos de valor agregado. O presente estudo visa, portanto, identificar uma destinação apropriada para as macrófitas residuais, almejando não apenas a reabilitação do ecossistema por meio da desintoxicação, mas também a obtenção sustentável de energia renovável. Dessa forma, uma abordagem metodológica foi implementada mediante a técnica estatística de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para avaliar a influência conjunta das variáveis concentração de massa de substrato e salinidade do meio sobre o rendimento de biometano, por meio do processo de fermentação anaeróbia. Na etapa inicial do estudo, foi obtido um rendimento de metano de $297,07 \pm 18,87$ mL/g STV, para uma concentração de substrato de 5 g/100 mL e 0 g/L de salinidade do meio. Na segunda etapa, através do DCCR, observou-se que os modelos linear e quadrático não se mostraram representativos, por apresentar porcentagens de variação explicada de 64,54% e 69,50%, respectivamente. O melhor rendimento de metano foi de 113,6 mL/g STV encontrado no reator com concentração de substrato igual a 10 g/100 mL e salinidade do meio de 0 g/L.

Palavras-chave: biogás; biomassa; digestão anaeróbia.

ABSTRACT

The excessive proliferation of aquatic macrophytes in the Lower São Francisco region has led to a series of adverse implications for both the local economy and the surrounding marine ecosystem. These negative effects include, among other aspects, a reduction in fishing activity, indications of contamination by thermotolerant coliforms, decreased levels of dissolved oxygen in the water, and a significant loss of biodiversity. In this context, approaches based on chemical, enzymatic, and biotechnological processes emerge as potential strategies to mitigate the impact of these macrophytes and promote the conversion of their residues into value-added products. Therefore, the present study aims to identify an appropriate destination for residual macrophytes, seeking not only ecosystem rehabilitation through detoxification but also the sustainable production of renewable energy. Thus, a methodological approach was implemented using the Central Composite Rotational Design (CCRD) statistical technique to evaluate the combined influence of substrate mass concentration and medium salinity on biomethane yield through the anaerobic fermentation process. In the initial stage of the study, a methane yield of 297.07 ± 18.87 mL/g VS was obtained for a substrate concentration of 5 g/100 mL and 0 g/L medium salinity. In the second stage, through CCRD, it was observed that the linear and quadratic models were not representative, presenting explained variation percentages of 64.54% and 69.50%, respectively. The highest methane yield was 113.6 mL/g VS, found in the reactor with a substrate concentration of 10 g/100 mL and medium salinity of 0 g/L.

Key words: anaerobic fermentation process; biogas; biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia adotada para a elaboração da análise bibliométrica.....	17
Figura 2 – Tipos de publicação sobre digestão anaeróbia e produção de biogás no período entre 1976 e 2023.	18
Figura 3 - Número acumulado de artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.....	19
Figura 4 - Áreas de estudo relacionadas com os artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	20
Figura 5 – Rede de colaboração entre os autores que assinaram os artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	22
Figura 6 – Rede de colaboração entre os países nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	26
Figura 7 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 1990.	27
Figura 8 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas no período entre 1991 e 2000.	29
Figura 9 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas no período entre 2001 e 2010.	30
Figura 10 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas no período entre 2011 e 2023.....	32
Figura 11 – (a) Mapa do Brasil e (b) Mapa da Bacia do Rio São Francisco.....	47
Figura 12 – (a) Municípios banhados pelo rio São Francisco no estado de Alagoas e (b) Rio São Francisco em Alagoas.....	48
Figura 13 – Grupos ecológicos das macrófitas.....	49
Figura 14 – Vias metabólicas e comunidades microbianas envolvidas na digestão anaeróbia.....	51
Figura 15 – Planejamento para duas variáveis codificadas, correspondentes à Tabela 11.	55
Figura 16 – (a) Coleta das macrófitas aquáticas em Piaçabuçu, Alagoas e (b) Separação e secagem da biomassa.	56
Figura 17 – Reatores anaeróbios utilizados na segunda etapa do estudo.	58

Figura 18 – Cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010 (a), coluna Carboxen™ 1010 PLOT e injeção da amostra gasosa com o auxílio de uma seringa GASTIGHT® (c).	60
Figura 19 – (a) Produção acumulada de metano ao longo do experimento e (b) e (c) curvas de produção acumulada de CH ₄ ajustadas pelo modelo de Gompertz modificado.	65
Figura 20 – Gráfico de Pareto dos efeitos A e B no rendimento de metano.	67
Figura 21 – (a) Gráfico de contorno e (b) superfície de resposta para o rendimento de metano em função da concentração de substrato (A) e salinidade do meio (B).....	68
Figura 22 – Gráfico de Pareto dos efeitos A e B no rendimento de metano.	71
Figura 23 – (a) Gráfico de contorno e (b) superfície de resposta para o rendimento de metano em função da concentração de substrato (A) e salinidade do meio (B).....	72
Figura 24 – (a) Produção acumulada de metano ao longo do experimento e (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k) e (l) curvas de produção acumulada de CH ₄ ajustadas pelo modelo de Gompertz modificado (continua).....	88
Figura 25 – (a) Produção acumulada de metano ao longo do experimento e (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k) e (l) curvas de produção acumulada de CH ₄ ajustadas pelo modelo de Gompertz modificado (continuação).....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Configurações para detecção de CH₄ por intermédio do cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010.	61
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os dez periódicos que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	21
Tabela 2 – Os dez autores que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	23
Tabela 3 – Os dez países que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	24
Tabela 4 – Ranking das instituições que publicaram o maior número de trabalhos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.	25
Tabela 5 – Resultados obtidos a cada década.	27
Tabela 6 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continua).	41
Tabela 7 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).	42
Tabela 8 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).	43
Tabela 9 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).	44
Tabela 10 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).	45
Tabela 11 – Classificação das macrófitas.	50
Tabela 12 – Matriz experimental com valores codificados.	54
Tabela 13 – Caracterização do lodo granular.	57
Tabela 14 – Efeitos e níveis escolhidos no planejamento fatorial aplicado.	58
Tabela 15 – Matriz experimental para planejamento 2 ² com pontos centrais e axiais.	59
Tabela 16 – ANOVA para o modelo linear para a variável resposta.	63
Tabela 17 – Parâmetros cinéticos para produção de metano calculado a partir do Modelo de Gompertz Modificado.	64
Tabela 18 – Resultados obtidos após o término da primeira etapa experimental.	65

Tabela 19 – Matriz de planejamento considerando um planejamento 2² com pontos centrais.....	66
Tabela 20 – Coeficientes não codificados.	67
Tabela 21 – ANOVA para o modelo linear para o rendimento de metano.....	68
Tabela 22 – Coeficientes não codificados.	69
Tabela 23 – Matriz de planejamento considerando um DCCR.	70
Tabela 24 – Coeficientes não codificados.	71
Tabela 25 – ANOVA para o modelo linear para o rendimento de metano.....	73
Tabela 26 – Parâmetros cinéticos para produção de metano calculado a partir do Modelo de Gompertz Modificado.	74
Tabela 27 - Produção acumulada de CH₄ (mL) obtida experimentalmente, referente a primeira etapa do estudo.	86
Tabela 28 – Produção acumulada de CH₄ (mL) obtida experimentalmente, referente a segunda etapa do estudo.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
CBHFS	Comitê da Bacia do Rio São Francisco
$C_{H,i}$	Volume de metano acumulado no headspace do recipiente no tempo atual
$C_{H,i-1}$	Volume de metano acumulado no headspace do recipiente no tempo anterior
CH_4	Metano
CSTR	Reator de mistura perfeita
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
H	Produção acumulada de metano
HCl	Ácido clorídrico
HY	Rendimento de metano
JIF	Fator de Impacto
LCA	Laboratório de Controle Ambiental
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
MQ	Média quadrática
N_2	Nitrogênio
$NaHCO_3$	Bicarbonato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
P	Potencial de produção de metano
PFR	Reator de fluxo de pistão
pH	Potencial hidrogeniônico
P_m	Potencial máximo de produção de CH_4
R^2	Coeficiente de regressão linear
R_m	Taxa máxima de produção de CH_4
SQ	Soma quadrática
ST	Sólidos totais
STF	Sólidos suspensos fixos
STV	Sólidos totais voláteis
STV_{apli}	Sólidos totais voláteis aplicado
TCD	Detector de condutividade térmica
TDH	Tempo de retenção hidráulica
UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo

UFAL	Universidade Federal de Alagoas
$V_{G,i}$	Volume total de biogás no tempo atual
$V_{G,i-1}$	Volume total de biogás no tempo anterior
$V_{H,0}$	Volume de metano acumulado no tempo inicial
$V_{H,i}$	Volume de metano acumulado no tempo atual
$V_{H,i-1}$	Volume de metano acumulado no tempo anterior
λ	Fase lag

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
2.1. Geral	16
2.2. Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 1976 E 2023	17
3.1. Metodologia	17
3.2. Resultados e discussão	18
3.2.1. Áreas de estudo	20
3.2.2. Revistas	20
3.2.3. Autores	21
3.2.4. Países, instituições e colaboração internacional	24
3.2.5. Palavras-chave	26
3.2.6. Produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas	41
3.3. Consideração a respeito da revisão bibliométrica	46
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	47
4.1. Rio São Francisco	47
4.2. Macrófitas aquáticas	49
4.3. Digestão anaeróbia	51
4.3.1. Hidrólise e Acidogênese	52
4.3.2. Acetogênese	52
4.3.3. Metanogênese	52
4.3.4. Sulfetogênese	53
4.4. Planejamento experimental	53
5. MATERIAIS E MÉTODOS	56

5.1. Materiais.....	56
5.1.1. Macrófitas aquáticas	56
5.1.2. Lodo granular	57
5.2. Procedimento experimental	57
5.3. Métodos analíticos	59
5.3.1. Análises físico-químicas.....	59
5.3.2. Análise de biometano por cromatografia gasosa.....	60
4.3.1 Análise de modelo	62
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
6.1. Geração de biometano a partir das macrófitas aquáticas	64
6.2. Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	66
7. CONCLUSÃO.....	76
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
APÊNDICE A – Curvas de produção de metano ajustadas pelo Modelo de Gompertz	
Modificado.	86

1. INTRODUÇÃO

O uso de plantas aquáticas para obtenção de biocombustíveis tem sido objeto de estudo por essas matrizes apresentarem altas taxas de produtividade e crescimento. A capacidade de adaptação a ambientes com áreas de difícil alcance, como águas salobras e salinas, é um diferencial. Além disso, a utilização da biomassa verde não tem usos concorrentes para alimentos ou fibras e seu cultivo não compete por terras agrícolas com as plantas terrestres.

Apesar das macrófitas aquáticas atuarem como filtradoras, retendo sedimentos em suspensão de nutrientes e liberando-os na água através de sua excreção ou durante sua decomposição, e fornecerem abrigo para peixes recém-nascidos e pequenos animais. Sua proliferação acaba gerando impactos negativos, como: redução na atividade pesqueira, indicação de contaminação por coliformes termotolerantes, diminuição nos níveis de oxigênio dissolvido na água e a perda significativa de biodiversidade.

A Expedição Científica do Baixo São Francisco, um programa de biomonitoramento ambiental em águas continentais brasileiras, identificou que a proliferação de macrófitas aquáticas, no leito do rio, tem ocasionado vários aspectos negativos para a economia local e ecossistema marinho da região. Pensando nisso, este trabalho busca encontrar alternativas para a destinação das macrófitas residuais, visando o desenvolvimento de um processo que possibilite a obtenção de produtos de valor agregado, como o biogás.

Neste cenário, a fermentação anaeróbia, ou digestão anaeróbia, surge como um processo biológico que consiste na transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples através de um consórcio de microrganismos. A ampla variedade de fontes de carboidratos utilizada como substrato, bem como a formação de metabólitos intermediários de valor agregado, são alguns dos fatores positivos do processo.

O presente trabalho teve como objetivo de destinar macrófitas aquáticas residuais, oriundas da região do Baixo São Francisco, para produção de biometano a partir do processo da digestão anaeróbia. O trabalho também envolveu a elaboração de uma abordagem metodológica mediante a técnica estatística de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) a fim de investigar as melhores condições de geração de biometano, como subproduto de valor agregado.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar as macrófitas aquáticas residuais como fontes precursoras da produção de biometano em reatores anaeróbios.

2.2. Específicos

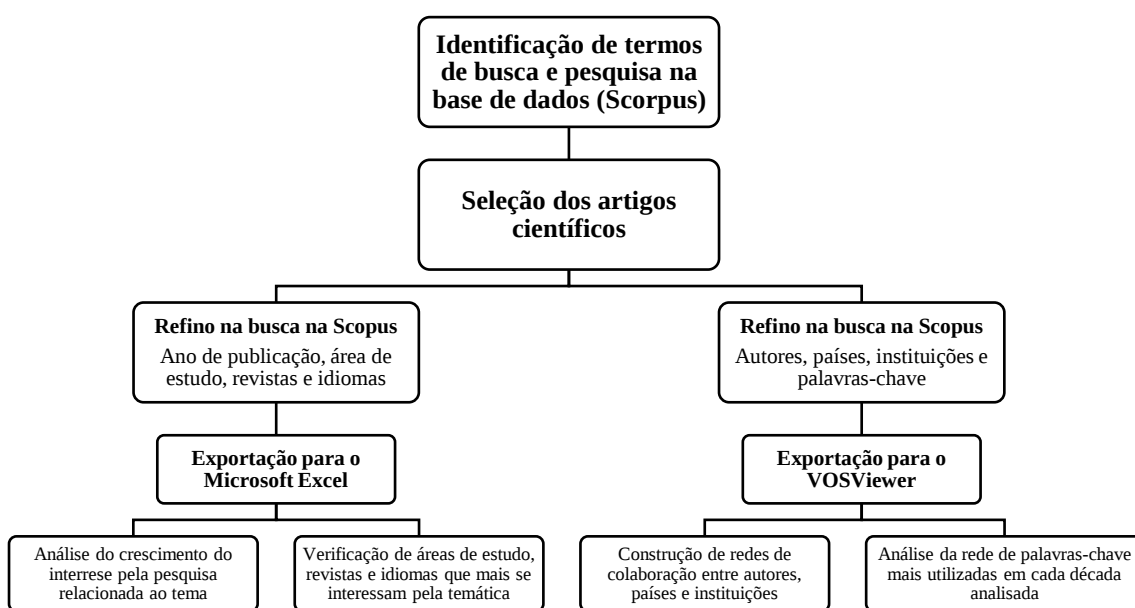
- Avaliar a eficiência de remoção de sólidos voláteis totais no processo.
- Avaliar os efeitos da concentração de substrato (g de substrato/100 mL de solução) e salinidade de meio (g de sal/kg de H₂O) com o auxílio da técnica de planejamento estatístico do tipo DCCR no rendimento de biometano.
- Descrever a produção de biometano através do modelo sigmoidal de Gompertz modificado, e obter os parâmetros cinéticos.

3. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS NO PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE 1976 E 2023

3.1. Metodologia

A pesquisa correlacionou a entrada de termos relacionados ao tema do estudo na busca de publicações na plataforma Scopus. Os dados obtidos foram refinados e exportados a fim de serem analisados. As características gerais dos artigos (ano de publicação, tipo de publicação, área de estudo e idioma) foram analisadas pelo software Microsoft Excel. Além disso, a frequência de palavras-chave nas publicações e a rede de parcerias entre autores e países foram avaliadas pelo software VOSViewer (versão 1.6.19). A metodologia foi similar a realizada no trabalho de Santos (2021), representada pela Figura 1.

Figura 1 – Metodologia adotada para a elaboração da análise bibliométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor – Adaptado de Santos (2021)

A análise bibliométrica foi realizada na base de dados da Scopus (Elsevier) hospedada no portal Periódicos CAPES (<https://www-scopus.ez9.periodicos.capes.gov.br/search/>). A busca foi baseada usando *strings booleanas*. A pesquisa retornou publicações com a

combinação de termos em seus títulos, resumos, palavras-chave e/ou corpo do texto. Posteriormente, a busca foi refinada para selecionar apenas artigos científicos.

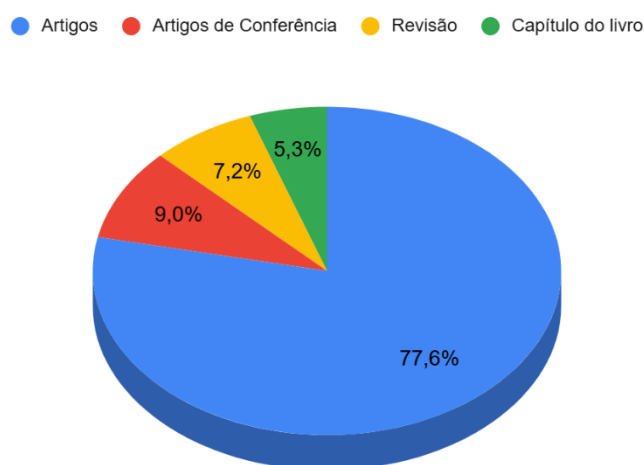
Os parâmetros foram extraídos e analisados para todo o período estudado. Posteriormente, o período de estudo foi avaliado a cada década, buscando verificar as particularidades de cada uma.

Na análise das áreas de conhecimento, foi utilizada a contagem de frequência da Scopus, levando em consideração que um artigo pode estar associado a mais de uma área de estudo. Quanto aos países e instituições, a base de dados considera as informações dos autores e co-autores de cada publicação, permitindo que um artigo esteja relacionado a múltiplos países ou instituições.

3.2. Resultados e discussão

A busca foi baseada usando as *strings booleanas*: “*Macrophytes*” AND “*Wastewater*” OR “*Anaerobic Digestion*” OR “*Biogas Production*” OR “*Methane Production*”. Foram encontradas 1.561 publicações no período entre 1976 e 2023. Os trabalhos estão distribuídos em 11 tipos de publicação, sendo as principais: 1.212 artigos científicos (77,6%), 140 artigos de conferência (9,0%), 112 revisões (7,2%), 82 capítulos de livro (5,3%) e 7 revisões de conferência (0,4%) (Figura 2).

Figura 2 – Tipos de publicação sobre digestão anaeróbia e produção de biogás no período entre 1976 e 2023.



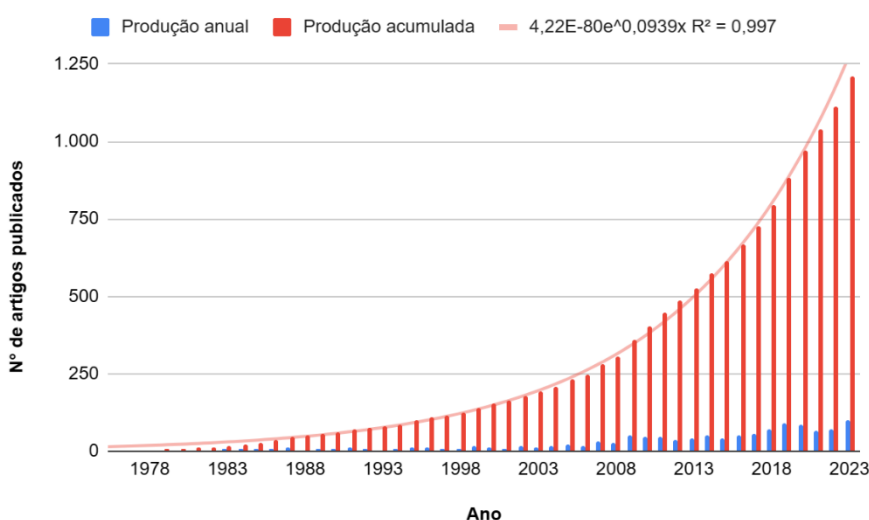
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Dos 1.212 artigos publicados, 341 têm o acesso livre (28,1%) e 871 necessitam que o usuário pague para obter acesso (71,9%). 1.145 artigos foram redigidos em inglês (93,7%), 25 em português (2,0%), 22 em chinês (1,8%), 12 em francês (1,0%) e 11 em espanhol (0,9%). A língua inglesa acaba sendo um pré-requisito para a indexação de trabalhos nos bancos de dados científicos.

O primeiro trabalho correlacionando as *strings booleanas* foi publicado em 1976 e relatava o estudo do ecossistema; formado por zooplâncton, zoobentos, peixes, macrófitas submersas e características dos pescadores; antes e após a instalação de uma estação de tratamento terciário em um lago de 1.022 hectares em Nova York (GREEN; SMITH, 1976). Entretanto, o primeiro trabalho relacionado à temática de produção de biogás a partir de macrófitas foi publicado em 1983 (HABIG; RYTHER, 1983).

O interesse na pesquisa relacionada à temática começou a crescer exponencialmente (Figura 3). O número acumulado de artigos publicados por ano no período de 1976 e 2023 foi ajustado a um modelo exponencial com um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,997$). Sugere-se, portanto, que 249 artigos relacionados ao tema poderão ser publicados em 2024, totalizando um acumulado de 1.461, e o número tenderá a crescer nos anos seguintes.

Figura 3 - Número acumulado de artigos científicos sobre digestão anaeróbica e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.

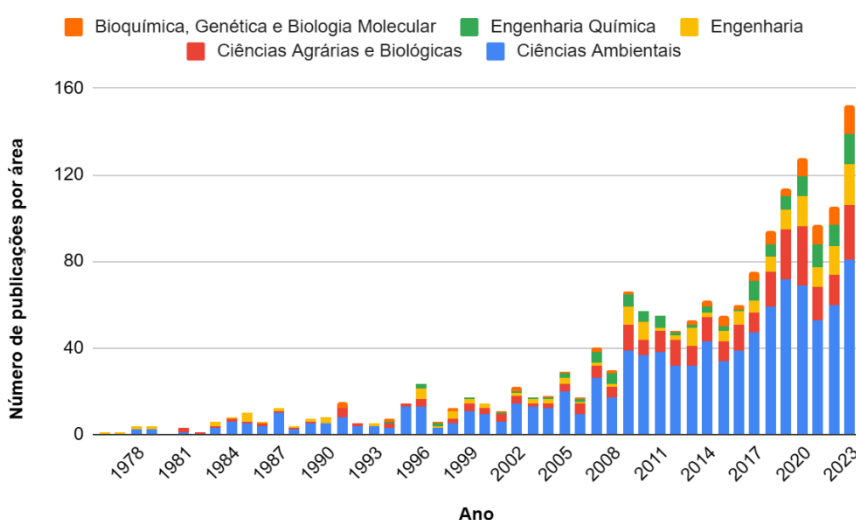


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.1. Áreas de estudo

As áreas de estudo dominantes, de acordo com Figura 4, são ciências ambientais (907; 46,4%), ciências agrárias e biológicas (269; 12,9%), engenharia (163; 7,8%), engenharia química (113; 5,4%), e bioquímica, genética e biologia molecular (83; 4,0%). É importante ressaltar que as categorias da Scopus não limitam os artigos a apenas uma área, ou seja, uma mesma publicação pode estar relacionada a diversas áreas do conhecimento.

Figura 4 - Áreas de estudo relacionadas com os artigos científicos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.2. Revistas

Os dez periódicos mais relevantes são responsáveis por 33,0% da produção sobre o tema no período entre 1976 e 2023 (Tabela 1). Os artigos foram publicados por quatro editoras: Elsevier, IWA Publishing, Taylor & Francis e Springer Nature. O periódico com maior produção de artigos foi o *Ecological Engineering*, com 97 publicações. Porém, o periódico mais citado foi o *Water Research*, com 2.219 citações.

Além disso, o *Water Research* também foi o que apresentou as maiores métricas de produção acadêmica da lista, com Fator de Impacto (*Journal Impact Factor*) igual a 12,8 e *CiteScore* igual a 19,8. Essas métricas são utilizadas para avaliar a relevância e a influência de periódicos científicos.

O Fator de Impacto (JIF) é calculado com base no número médio de citações, cobertos no banco de dados da plataforma Web of Science, recebidas por artigos publicados em um determinado período, comumente dois anos. Enquanto o *CiteScore* considera o número total de citações recebidas, cobertos no banco de dados da plataforma Scopus, por todos os artigos publicados em um determinado periódico durante um período de três anos.

CiteScore acima de 3,0 é frequentemente visto como indicativo de um periódico de alta qualidade. No Fator de Impacto (JIF) o periódico geralmente precisa estar acima de 5,0 para ser classificado de alta qualidade.

Tabela 1 – Os dez periódicos que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.

#	Revista	Total de publicações	Citações	Fator de impacto 2022	CiteScore 2022	Editores
1	Ecological Engineering	97	5.171	3,8	7,6	Elsevier
2	Water Science And Technology	58	1.037	2,7	4,2	IWA Publishing
3	Science Of The Total Environment	54	3.352	9,8	16,8	Elsevier
4	Water Research	35	2.219	12,8	19,8	Elsevier
5	Water Air And Soil Pollution	33	896	2,9	4,2	Springer Nature
6	International Journal Of Phytoremediation	28	602	3,7	6,9	Taylor & Francis
7	Environmental Science And Pollution Research	25	673	5,8	7,9	Springer Nature
8	Chemosphere	25	1.525	8,8	13,3	Elsevier
9	Bioresource Technology	25	1.871	11,4	19,0	Elsevier
10	Journal Of Environmental Management	20	985	8,7	13,4	Elsevier

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.3. Autores

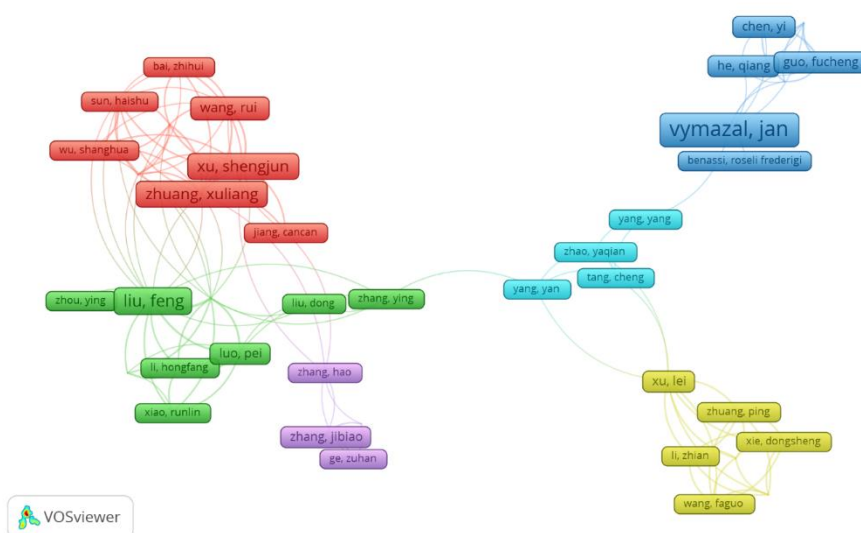
No período entre 1976 e 2023 um total de 4.238 autores contribuíram com os 1.212 artigos publicados sobre o tema. Destes, 546 autores publicaram pelo menos dois trabalhos, 190 três, 97 quatro e 49 cinco.

O autor mais influente foi Maine, M. A. que publicou 19 trabalhos, 847 citações e h-index de 26 (referentes a todas as publicações do autor em diferentes áreas); seguido por HADAD, H.R. com 13 trabalhos, 476 citações h-index 23; empatado com Toda, T. com 13 trabalhos, 208 citações e h-index de 32. O h-index relaciona o número de artigos publicados e o número de citações que o autor recebeu (Tabela 2).

Os mais citados são VYMAZAL, J. com 885 citações e h-index de 59; e TRIPATHI, B.D. com 863 citações e h-index de 36. Quanto à nacionalidade, os chineses são os mais influentes na área. O mapa construído no VOSViewer (Figura 5) mostra a rede de colaboração formada por diversos autores por meio de caixas conectadas. A caixa representa o autor, o tamanho da caixa mostra o número de publicações e as linhas mostram os links de coautoria. Os níveis de colaboração podem ser verificados pela espessura das linhas conectando as caixas.

No entanto, é importante observar que ao destacar os sobrenomes, a análise pode ser comprometida devido à presença de sobrenomes e nomes idênticos, especialmente na Ásia. Além disso, existem casos em que o mesmo autor muda de sobrenome (por exemplo, devido a casamento), resultando em sua contagem como indivíduos distintos. Portanto, a identificação dos autores por meio de um número de identificação é mais confiável.

Figura 5 – Rede de colaboração entre os autores que assinaram os artigos sobre digestão anaeróbica e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 2 – Os dez autores que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.

#	Autores	ID Scopus	Total de publicações	h-index	Total de citações	Ano da primeira publicação	Instituição	País
1	Maine, M.A.	5601209040	19	26	847	2004	Conselho Nacional de Investigações Científicas e Técnicas	Argentina
2	Hadad, H.R.	56011876300	13	23	476	2006	Universidad Nacional del Litoral	Argentina
3	Toda, T.	7202683258	13	32	208	2014	Universidade de Soka	Japão
4	Ban, S.	7101853193	12	24	199	2014	Universidade da Província de Shiga	Japão
5	Scholz, M.	7202888741	10	48	355	2001	Universidade de Salford	Reino Unido
6	Tripathi, B.D.	7102369126	10	36	863	1991	Universidade Hindu de Banaras	Índia
7	Vymazal, J.	7006233773	10	59	885	1996	Universidade Checa de Ciências da Vida Praga	República Checa
8	Bhunja, P.	22937208700	9	27	106	2017	Instituto Indiano de Tecnologia Bhubaneswar	Índia
9	Borin, M.	7006314141	9	33	207	2010	Università degli Studi di Padova	Itália
10	Koyama, M.	56203883200	9	16	178	2014	Instituto de Tecnologia de Tóquio	Japão

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.4. Países, instituições e colaboração internacional

Dos 1.212 artigos publicados sobre o tema, 18 não reportam o país dos autores e foram excluídos dessa análise. A pesquisa relacionada ao tema esteve presente nos 5 continentes. Além disso, 78 países publicaram pelo menos um artigo relacionado ao tema, 55 pelo menos 5, e 37 pelo menos 10. Dentre os 1.212 artigos, pouco mais de 1/3 (34,52%) foram publicados por quatro países: China (9,57%), Índia (9,25%), Estados Unidos (8,93%) e Brasil (6,76%). Os dez países com mais publicações estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Os dez países que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.

#	País	Total de publicações	Citações
1	China	150	3175
2	Índia	145	3532
3	Estados Unidos	140	5843
4	Brasil	106	2175
5	Espanha	59	2157
6	Reino Unido	57	3861
7	Itália	53	1550
8	Austrália	51	2202
9	Canadá	44	1386
10	Alemanha	44	1601

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O Brasil ocupa a quarta posição entre os países que mais publicaram sobre o tema. As universidades e centros de pesquisa brasileiros, filiados aos autores dos trabalhos, ocupam posições diversas no ranking das instituições com maior número de publicações, com destaque para as universidades das regiões Sudeste e Sul do Brasil, que somam 103 publicações (Tabela 4).

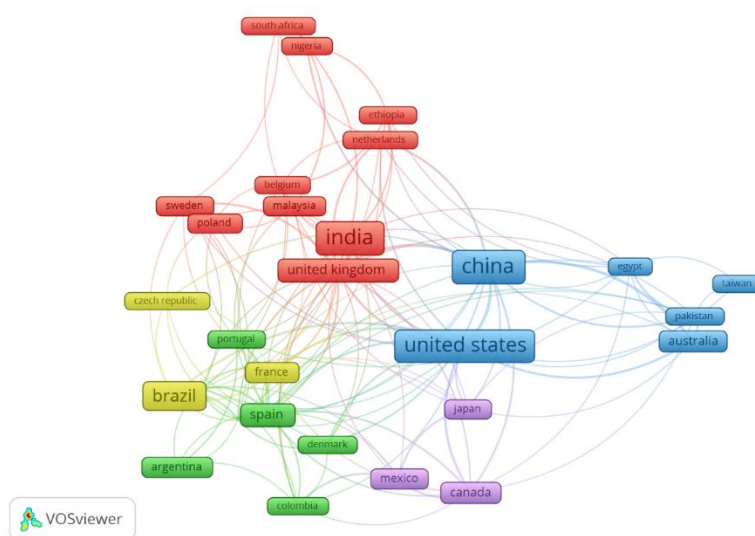
Tabela 4 – Ranking das instituições que publicaram o maior número de trabalhos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.

#	Instituição	Total de documentos	País	Estado
1	Chinese Academy of Sciences	52	China	-
2	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas	34	Argentina	-
3	University of Chinese Academy of Sciences	24	China	-
4	Universidad Nacional del Litoral	19	Argentina	-
5	University of Florida	14	Estados Unidos	-
16	Universidade Estadual do Oeste do Paraná	10	Brasil	Paraná
19	Universidade Federal do Rio Grande do Sul	9	Brasil	Rio Grande do Sul
25	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	9	Brasil	Paraná
28	Universidade Federal do Rio de Janeiro	8	Brasil	Rio de Janeiro
31	Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho	8	Brasil	São Paulo
33	Universidade Federal de Viçosa	8	Brasil	Minas Gerais
34	Universidade Federal de Santa Catarina	8	Brasil	Santa Catarina
51	Universidade Estadual de Campinas	6	Brasil	São Paulo
52	Universidade Federal de Minas Gerais	6	Brasil	Minas Gerais
66	Universidade de São Paulo	5	Brasil	São Paulo
73	Universidade Federal do Paraná	5	Brasil	Paraná
87	Universidade Federal de Santa Maria	5	Brasil	Rio Grande do Sul
98	Universidade Federal Fluminense	4	Brasil	Rio de Janeiro
118	Universidade de Santa Cruz do Sul	4	Brasil	Rio Grande do Sul
120	Pontifícia Universidade Católica do Paraná	4	Brasil	Paraná
128	Universidade Estadual de Maringá	4	Brasil	Paraná
144	Universidade Federal do Amazonas	3	Brasil	Amazonas
145	Universidade Federal do ABC	3	Brasil	São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No mapa gerado pelo VOSViewer (Figura 6), a conexão entre as caixas ilustra a rede de colaboração internacional entre os países. Cada caixa representa um país, e o tamanho da caixa indica o número de publicações de autores vinculados a instituições desse país. As linhas entre as caixas indicam os vínculos de co-autoria entre os países, e a espessura dessas linhas reflete o nível de colaboração existente entre eles.

Figura 6 – Rede de colaboração entre os países nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.5. Palavras-chave

Dos 1.212 artigos publicados sobre o tema, verificou-se que 3.024 palavras-chave foram usadas pelo menos 2 vezes, 1.895 três, 1.377 quatro, 1.083 cinco, e 569 dez. Ao longo dos 47 anos as pesquisas relacionaram-se, principalmente, ao tratamento e qualidade de água, e recuperação de recursos, tais como: tratamento de efluentes (3,70%; 535), fitorremediação (1,43%; 207), biorremediação (1,40%; 202), digestão anaeróbia (0,34%; 49) e metano (0,32%; 46).

Os objetivos dos estudos foram diversos, tais como: remoção de poluentes (1,38%; 199), purificação da água (0,62%; 90), remoção de nitrogênio (0,73%; 106), crescimento das plantas (0,50%; 72) e comunidade microbiana (0,35%; 51). Além disso, foram identificadas palavras-chave correlacionadas aos parâmetros do processo de digestão anaeróbia: demanda química de

oxigênio (1,05%; 152), demanda biológica de oxigênio (0,36%; 0,94%), pH (0,47%; 68) e tempo de retenção hidráulica (0,30%; 43).

O interesse científico pelo tema ao longo do tempo foi avaliado analisando quatro períodos distintos: 1976 – 1990, 1991 – 2000, 2001 – 2010 e 2011 – 2023 (Tabela 5).

Tabela 5 – Resultados obtidos a cada década.

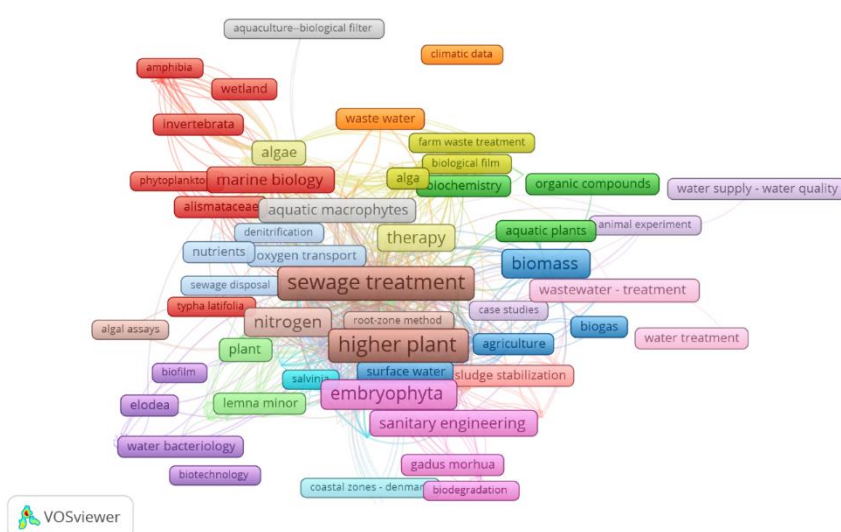
#	Período	Nº de artigos	Nº palavras-chave
1	1976 – 1990	60	360
2	1991 – 2000	93	874
3	2001 – 2010	249	2.985
4	2011 – 2023	811	6.900

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.5.1. 1976 – 1990

No período de 14 anos, foram publicados 60 artigos sobre a temática e o software VOSViewer identificou 360 palavras-chave usadas pelos autores pelo menos uma vez, 92 duas, 51 três e 30 cinco. O mapa com clusters (Figura 7) mostra as palavras usadas pelo menos uma vez.

Figura 7 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas no período entre 1976 e 1990.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A publicação americana de Habig e Ryther (1983) foi o primeiro trabalho que discutiu a produção de metano, a partir da digestão anaeróbia, fazendo uso de macrófitas como substrato do processo. Nele os autores compararam o desempenho de três tipos de macrófitas (*Gracilaria*, *Ulva* e *Sargassum*) variando o tempo de retenção hidráulica (20, 30, 40 e 50 dias) e a carga orgânica (adição de 10 ou 20% do peso úmido de substrato em cada carga). Os digestores de 2 L, foram isolados termicamente, e mantidos a $28 \pm 3^\circ\text{C}$. Ao final do experimento, os autores concluíram que a produção de metano aumentou com o tempo de retenção para todas as espécies e a *Ulva* apresentou a melhor eficiência de conversão biológica devido a uma maior remoção de sólidos voláteis, sendo o rendimento de metano igual a 0,23 L/g STV nos testes com 50 dias de retenção hidráulica. A *Gracilaria* mostrou baixa produção inicial devido à resistência do ágar à degradação microbiana, mas apresentou bons resultados em tempos de retenção mais longos. O *Sargassum* teve bom desempenho em tempos curtos, mas menor produção em tempos longos devido à presença de componentes menos digestíveis. Todas as espécies alcançaram conteúdos de metano superiores a 60% no biogás. O sistema de digestão de baixo custo, idealizado pelos autores, apresentou resultados comparáveis aos digestores mais complexos.

Sistemas de purificação de água e esgoto foram desenvolvidos fazendo uso de macrófitas aquáticas para promover o tratamento. O biogás gerado durante o processo foi utilizado com fonte energética (MOUGIN, 1983; SAUZE, 1983).

Três anos depois, um sistema, de múltiplos estágios, com o objetivo de produzir metano, suplementos proteicos e rações fibrosas a partir de resíduos inerentes à suinocultura, utilizando bactérias metanogênicas, bactérias fotossintéticas, microalgas e macrófitas aquáticas (*Eichhornia*, *Lemna* e *Hydrocotyle*) foi desenvolvido. O sistema foi composto por um digestor anaeróbio, lagoas facultativas e tanques de macrófitas. O digestor anaeróbio, com 20 m³ de capacidade e operado sob temperatura ambiente e variando o tempo de retenção hidráulica (10 a 40 dias), produziu em média 0,27 m³ de biogás/kg STV, com 68% de metano. As macrófitas foram utilizadas como substrato no processo de digestão de três maneiras: cortadas (0,28 m³/kg STV), extrusada (0,23 m³/kg STV) e como suco após prensagem (0,38 m³/kg STV). A maior disponibilidade de nutrientes e compostos orgânicos, a redução de fibras, e partículas menores e maior área de contato contribuíram para que o suco após prensagem apresentasse o maior rendimento. Os autores destacaram que a baixa produção de metano estaria associada a falta de aquecimento e mistura no digestor (LINCOLN et al., 1986).

Taheruzzaman e Kushari (1989) avaliaram a possibilidade de três macrófitas (*Azolla pinnata*, *Eichhornia crassipes* e *Hydrilla verticillata*), cultivadas em um meio enriquecido em

nutrientes, serem utilizadas como fonte de proteína e produção de biogás, considerando variações sazonais. A biomassa foi digerida em reatores de vidro com capacidade de 5 L. A *Eichhornia crassipers* apresentou a maior produção de biogás entre os três tipos de macrófitas utilizado, com 44.381 L por ano. Os autores correlacionam o resultado ao fato da degradação de hemicelulose e lignina presentes na composição da *Eichhornia*, o que facilitaria a liberação de compostos fermentáveis no meio reacional, utilizados pelos microrganismos metanogênicos para a produção de metano.

3.2.5.2. 1991 – 2000

No período de 10 anos, foram publicados 93 artigos sobre a temática e o software VOSViewer identificou 874 palavras-chave usadas pelos autores pelo menos uma vez, 212 duas, 124 três e 73 cinco. O mapa com clusters (Figura 8) mostra as palavras usadas pelo menos uma vez.

Figura 8 – Palavras-chave utilizadas pelos autores nos artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas no período entre 1991 e 2000.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A produção de biogás não foi um dos temas centrais dos trabalhos publicados no período entre os anos de 1991 e 2000. Entretanto, as macrófitas aquáticas continuaram sendo utilizadas em trabalhos com o intuito de remoção de matéria orgânica e nutrientes, como o nitrogênio total, do esgoto sanitário, por meio do processo da digestão anaeróbia (ANSOLA;

componentes em proporções variadas. Os autores concluíram que a co-digestão aumentou a eficiência do biogás, proporcionou melhor tamponamento, redução de ácidos graxos e evitou problemas de acidificação observados em substratos isolados. Totora foi o melhor co-substrato devido ao seu alto teor de carbono orgânico e alta proporção de hemicelulose. Houve aumento na produtividade de biogás em 130% (lhama), 60% (vaca) e 40% (ovelha). Porém, misturas com totora apresentaram um aumento na acidificação em altas proporções, acima 58% (com base em sólidos voláteis), inibindo o processo. O intervalo de rendimento de metano observado foi de 0,07 a 0,20 m³/kg STV.

O'Sullivan et al. (2010) avaliaram o potencial de três tipos de plantas aquáticas invasoras (jacinto-d'água, cabomba e salvinha) como substrato no processo de digestão anaeróbia, com base na produtividade e qualidade do biogás produzido. Inicialmente, o trabalho foi conduzido em reatores de bancada (100 mL), e posteriormente, em reatores pilotos (200 L), em regime batelada, com o intuito de simular condições comerciais. Apesar do teor de metano para as três plantas aquáticas terem sido iguais (50%), o jacinto-d'água apresentou a maior produção de biogás com 267 L/kg STV. Os autores concluíram que a digestão anaeróbia ofereceu uma solução sustentável para controlar espécies invasoras e gerar energia renovável.

Em outra frente de trabalho, as macrófitas aquáticas foram utilizadas na remoção de matéria orgânica, nutrientes e redução de gases do efeito estufa de sistemas projetados com lagoas ou canais artificiais rasos, conhecidos como *wetlands* ou zonas úmidas construídas (MALTAIS-LANDRY; MARANGER; BRISSON, 2009).

3.2.5.4. 2011 – 2023

No período de 13 anos, foram publicados 811 artigos sobre a temática e o software VOSViewer identificou 6.900 palavras-chave usadas pelos autores pelo menos uma vez, 2.341 duas, 1.424 três e 831 cinco. O mapa com clusters (Figura 10) mostra as palavras usadas pelo menos uma vez.

Adeleye, Adetunji e Bamgboye (2013) coletaram macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipers*) na região do Delta do Níger, na Nigéria, com o objetivo de utilizar a biomassa em um biorreator, com capacidade de 50 L. O trabalho foi idealizado para controlar a poluição ambiental e ajudar na redução da pobreza da região agregando um produto de fonte renovável de energia alternativa. Duas condições foram utilizadas no estudo: oligotróficas e eutróficas. Os autores concluíram que para as condições oligotróficas foi produzido até 53 L de biogás em 11 dias, e para as condições eutróficas foi produzido até 22 L de biogás em 40 dias. Em condições oligotróficas, o metabolismo das bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia pode ser mais eficiente devido à menor presença de inibidores. A biomassa nessas condições pode ser mais rica em compostos orgânicos facilmente degradáveis. Além disso, o experimento nessas condições ocorreu na estação seca, com temperaturas mais altas (30-39 °C) o que favorece a atividade microbiana.

Cohen et al. (2013) avaliaram a eficiência de um sistema de zonas úmidas construídas no polimento de águas residuárias (remoção de nitrato, fosfato, compostos estrogênicos e *E. Coli*) e a viabilidade da biomassa (algas filamentosas, lentilhas-d'água, *Azolla filiculoides*, *Hydrocotyle ranunculoides* e *Ludwigia hexapetala*) ser utilizada para produção de biogás, a partir da digestão anaeróbia. A biomassa foi co-digerida com resíduos de vinificação e esterco ou glicerol bruto, subproduto da produção de biodiesel. O trabalho foi conduzido em dois reatores, com capacidade de 5,7 m³, de fluxo descendente, com agitação. O tempo de retenção hidráulica foi de 60 dias. Os autores observaram que após a substituição do esterco pelo glicerol bruto houve aumento no rendimento de metano, de 0,28 para 0,53 m³/kg STV. O fato do esterco pode conter compostos inibidores, como a amônia, e o glicerol bruto ter uma razão C/N mais equilibrada e uma maior disponibilidade de carbono acessível contribuíram para o aumento da eficiência na digestão anaeróbia. O biogás gerado passou por um processo de purificação para remoção de sulfeto a fim de ser empregado em um gerador elétrico.

Koyama et al. (2014) destacaram que a proliferação excessiva de plantas aquáticas, como as macrófitas, representa um impacto negativo ao meio ambiente e que tratamentos sustentáveis precisam ser aplicados a fim de mitigá-lo. O trabalho investigou cinco espécies de macrófitas submersas (*Ceratophyllum demersum*, *Elodea nuttallii*, *Egeria densa*, *Potamogeton maackianus* e *Potamogeton malaianus*) do Lago Biwa, no Japão, com o objetivo de avaliar a viabilidade para produção de biogás. A biomassa foi triturada (0,5-1,5 cm) para potencializar a digestão do resíduo. Reatores de 500 mL operados em batelada, durante 14 dias, foram utilizados para avaliar a produção de metano. A razão substrato/inóculo foi de 1:2, com base nos sólidos voláteis. O rendimento de metano variou de 161,2 a 360,8 mL/g STV, a espécie que

apresentou o melhor rendimento foi a *Elodea nuttallii*. Os autores concluíram que espécies com menor teor de lignina obtiveram maiores rendimentos de metano. Já espécies com alto teor de lignina necessitariam de pré-tratamento para melhorar a eficiência da conversão, porque a lignina é um componente estrutural resistente que dificulta a degradação pelos microrganismos.

Pastare et al. (2014) avaliaram a sustentabilidade de um sistema energético a partir de plantas aquáticas utilizando uma abordagem integrada de Análise de Múltiplos Critérios (MCA) e Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) para avaliar cenários de produção de biogás. No trabalho, foram utilizados reator em batelada, com capacidade de 100 mL, incubados a 37 °C. Seis cenários foram analisados, incluindo coleta de algas em ambientes naturais e cultivo em tanques. Foi identificado que a *Ceratophyllum demersum* tem grande potencial para ser usada na produção de biogás na Letônia. O rendimento obtido foi de 554 L/kg STV. Os autores apontaram que o uso combinado de biomassa com outros insumos, como esterco, pode melhorar a eficiência econômica e técnica. Além disso, apontam a importância de explorar a viabilidade em larga escala e minimizar impactos ambientais.

O estudo do efeito do pré-tratamento térmico alcalino na digestão anaeróbia de duas espécies distintas de macrófitas, com diferentes teores de lignina, sendo uma rica em lignina (*Potamogeton maackianus*) e outra pobre (*Egeria densa*), foi realizado por Koyama et al. (2015). O trabalho teve como objetivo promover a quebra da lignina presente nas espécies a fim de avaliar o efeito no rendimento de metano. As biomassas foram trituradas (0,5-1,5 cm) e pré-tratadas com solução de NaOH (0,10 e 0,20 g NaOH/g ST), sob uma temperatura de 80 °C, por 3 h. Posteriormente, houve neutralização com HCl até pH igual a 7,0. O processo de digestão anaeróbia foi conduzido em reatores em batelada, com capacidade de 500 mL, com uma razão substrato:inóculo igual a 1:2 (base de sólidos voláteis). Os autores concluíram que o pré-tratamento removeu até 79,2% de lignina da espécie *P. maackianus* e 57,8% da *E. densa*. O rendimento de metano aumentou 51% (de 161 para 243 mL/g STV) após o pré-tratamento com 0,20 g NaOH/g ST para a espécie *P. maackianus*, e 24% (de 300 para 371 mL/g STV) para a espécie *E. densa*. O pré-tratamento se mostrou mais efetivo para macrófitas ricas em lignina. No entanto, concentrações mais altas de NaOH podem liberar compostos derivados de lignina que inibiriam o processo, principalmente, em temperaturas superiores a 100 °C. O maior rendimento de metano foi obtido utilizando o pré-tratamento de 0,20 g NaOH/g ST para a espécie *E. densa*, sendo de 371 mL/g STV. Isso acontece, pois a menor quantidade de lignina na biomassa facilitaria a biodegradação da celulose e hemicelulose.

Koyama et al. (2017a) seguiram estudando os efeitos inibitórios da lignina dissolvida, derivado do pré-tratamento alcalino da *P. maackianus*, nas três etapas da digestão anaeróbia

(hidrólise, acidogênese e metanogênese). A lignina dissolvida foi extraída após o pré-tratamento com 0,20 g NaOH/g ST a 80 °C por 3 h. Posteriormente, foi purificada e caracterizada quimicamente. Os autores concluíram que a hidrólise foi a etapa mais impactada, tendo sua eficiência reduzida em 35% em 5 g/L de lignina dissolvida. Além disso, observou-se que a fase lag foi prolongada nas duas primeiras etapas da digestão anaeróbia, indicando forte inibição devido à adsorção de enzimas como celulase na lignina. Mais uma vez, ressalta-se a necessidade de otimizar os pré-tratamentos alcalinos, para minimizar a geração de compostos inibitórios.

Koyama et al. (2017b) voltaram a estudar os efeitos ao longo prazo do pré-tratamento alcalino na digestão anaeróbia na *P. maackianus*. Houve ampliação de escala e foram usados reatores CSTR, com capacidade de 4,5 L, operado de forma semi-contínua, com tempo de retenção hidráulica de 40 dias e com agitação de 100 rpm, aplicando condições mesofílicas (37 °C) e termofílicas (55 °C) durante 120 dias. Em condições mesofílicas, o rendimento acumulado de metano foi 42% maior (255,9 mL/g STV) que o reator controle, e o período de inibição ocorreu entre os dias 22 e 44, tendo uma recuperação após o dia 44. Nas condições termofílicas, o rendimento acumulado de metano foi 8% maior (259,7 mL/g STV) que o reator controle, e o período de inibição ocorreu entre os dias 42 e 64, tendo uma recuperação após o dia 64. O acúmulo da lignina dissolvida provocou a redução da eficiência de hidrólise e metanogênese, e o acúmulo de ácidos voláteis, como acético e propiônico. Após o período de inibição, a produção de metano se instabilizou, e houve uma aclimação microbiana à lignina dissolvida. Os autores concluíram que a digestão em condições mesofílicas é mais estável e eficiente em comparação as condições termofílicas.

Koyama et al. (2017c) voltaram a utilizar pré-tratamento térmico alcalino na digestão anaeróbia de macrófita, porém em co-digestão com resíduos alimentares acidificados, buscando reduzir o uso de agentes neutralizantes e aumentar o rendimento de metano. No trabalho a razão, em sólidos voláteis, entre macrófitas e resíduos alimentares acidificados (0:1, 1:1, 5:1, 10:1 e 1:0) foi investigada. Os autores relataram que a adição de resíduos alimentares reduziu o pH das macrófitas pré-tratadas de 12,3 para 10,0, permitindo uma redução de até 50% no uso de HCl para neutralização. Além disso, a co-digestão melhorou a produção de metano em até 37%, quando comparada a produção do substrato puro. Esse aumento foi atribuído apenas à maior degradabilidade dos resíduos alimentares, não havendo sinergia entre os substratos. A lignina dissolvida impactou negativamente a hidrólise, pela presença de inibidores no processo. O maior rendimento de metano (274,8 mL/g STV) foi observado quando a razão entre os substratos foi de 1:1.

A viabilidade do uso de macrófitas aquáticas (*Elodea nuttallii*, *Glyceria fluitans*, *Phragmites australis*) como substrato foi estudada por Moeller et al. (2018) na Alemanha. O estudo contou com 39 amostras de biomassa de diferentes corpos hídricos (rios, lagos e canais) coletadas no verão e outono. O potencial específico de metano variou entre 142 (*Phragmites australis*) a 372 (*Glyceria fluitans*) L/kg STV. Os autores concluíram que o uso da biomassa é adequado para a produção de biogás, que a produtividade de está ligada a espécie, e que biomassas com alto teor de lignina precisam de um pré-tratamento.

A macrófita aquáticas *Elodea nuttallii* foi utilizada no estudo de Stabenau et al. (2018) como fonte de recuperação de fósforo por meio da digestão anaeróbia, com foco na aplicação do digestato como fertilizante em sistemas de agricultura orgânica. A biomassa foi coletada no Lago Goitzsche, na Alemanha. A coleta foi realizada em áreas fixas e em diferentes profundidades. A produção de biogás foi de 257,5 mL/g STV, com teor médio de metano de 58%. Os autores concluíram que a *Elodea nuttallii* apresenta bom potencial como fonte de fósforo reciclado, sendo um digestato adequado para fertilização em agricultura orgânica e que a digestão anaeróbia permite a recuperação eficiente do fósforo.

Gallegos et al. (2018) e Bauer et al. (2018) testaram misturas de silagem de plantas aquáticas e palha de trigo em um processo de produção de biogás. No trabalho de Gallegos et al. (2018), os autores desenvolveram um método de silagem para *Elodea nuttallii* e *Elodea canadensis* misturada com palha de trigo, com o objetivo de usar a biomassa para produção de biogás em regiões de clima frio. A *Elodea* foi utilizada pura, como também com palha de trigo (triturada ou moída) em diferentes teores de sólidos totais (30% e 45 %). O potencial específico de metano variou entre 166,1 e 242,2 mL/g STV. Observou-se que a mistura de biomassa aquática com substratos lignocelulósicos secos são promissoras para uso em plantas de biogás. Já Bauer et al. (2018) utilizaram o mesmo princípio, mas operando um reator semi-contínuo. Os autores observaram que o processo se manteve estável até 2 g STV/L·d de taxa de carga orgânico, pois acima disso observou uma acidificação do meio e queda no desempenho. O rendimento de metano foi de aproximadamente 259 mL/g STV·d.

Zehnsdorf et al. (2018) investigaram o potencial de *Elodea* e *Myriophyllum* para uso em plantas de digestão anaeróbia. As macrófitas foram coletadas em três lagos alemães com auxílio de mergulhadores em diferentes profundidades (2, 4 e 6 m). Durante o estudo, 35 amostras de locais distintos foram analisadas. Os autores estimaram uma produção de 22 milhões Nm³ de metano/ano a partir da biomassa aquática. Além disso, os melhores resultados foram encontrados quando houve a mistura da biomassa aquática com palha, atingindo 228 mL/g STV. Os autores concluíram que a biomassa aquática poderia substituir até 6.000 ha de

milho para biogás. Porém, precisaria haver melhorias tecnológicas na cadeia de valor (corte, coleta e logística). A regionalidade também acaba sendo um entrave para a utilização dessa biomassa na produção de biogás.

Röhl et al. (2019) apresentaram um estudo de caso, levando em consideração que vários trabalhos comprovaram a eficiência de macrófitas aquáticas como substrato na produção de biogás, analisando onde e quanto de biomassa poderia ser coletada com o intuito de geração de energia. O trabalho foi realizado na Alemanha, e os autores concluíram que a quantidade de biomassa coletada seria inferior à de outros substratos de gestão de paisagem. Apesar disso, algumas mudanças viabilizariam economicamente a exploração de macrófitas aquáticas na produção de biogás.

A avaliação da extração sequencial de subprodutos valiosos (seiva, ulvana e proteínas) da alga *Ulva lactuca* para produção de biometano foi estudada por Mhatre et al. (2019). Os ensaios foram conduzidos em batelada. A biomassa sem o tratamento gerou 210 mL/g STV. Porém, o tratamento sequencial completo removendo seiva, ulvana e proteína obteve o melhor rendimento, sendo de 408 mL/g STV. Além da melhora na produção de metano houve a redução do tempo de latência (fase *lag*). Os autores justificam esse aumento devido a remoção dos compostos inibitórios presentes na *Ulva lactuca* por meio do tratamento. O processo permitiu também a extração de produtos com valor comercial antes da produção de energia.

Fernandes et al. (2019) utilizaram *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* após processo de fitorremediação de águas contaminadas com cádmio (Cd) para produção de biogás. As macrófitas foram cultivadas em solução nutritiva com 0,8mg/L de Cd por 20, 40 e 60 dias. A biodigestão ocorreu em microbiodigestores, de material PET, com 256 g de biomassa, 28 mL de lodo anaeróbio de reator UASB de um frigorífico, e 144 mL de água destilada. Os autores concluíram que a presença de Cd não inibiu a produção de metano, indicando que as macrófitas contaminadas podem ser usadas para geração de biogás. A maior produção de metano foi identificada com a *Pistia stratiotes* sem Cd por 40 dias (1832 mL). Além disso, o tratamento, durante 20 dias, contendo o combinado entre as espécies de macrófitas apresentou a menor produção de metano devido à maior concentração de lignina.

Pastare e Romagnoli (2019) avaliaram a produção de biogás a partir da co-digestão de esterco bovino com três tipos de biomassa: *Cerathophyllum demersum*, *Fucus vesiculosus* e *Ulva intestinalis*. O estudo foi conduzido sob condições climáticas e econômicas da Letônia, usando metodologia de Análise de Custo do Ciclo de Vida (LCCA). As macrófitas foram lavadas e trituradas. A co-digestão ocorreu na razão 1:5 (macrófitas:esterco, com base no sólidos voláteis). O maior rendimento foi observado com a espécie *Cerathophyllum demersum*,

405,3 mL/g STV. Os autores concluíram que nenhum cenário se mostrou economicamente viável para a produção de biogás a partir do resíduo em estudo.

Kist et al. (2020) realizaram um teste de potencial de biometano (BMP) para avaliar três espécies de macrófitas aquáticas: *Eichhornia crassipers*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia molesta*. Houve pré-tratamento da biomassa por meio do processo de sonificação a fim de reduzir o tempo de fase *lag* e aumentar a produção de metano. O estudo foi conduzido em reatores anaeróbios em batelada, com capacidade de 160 mL, operados em condições mesofílicas e em constante agitação, durante 46 dias. A sonificação teve duas energias específicas: 40.000 e 80.000 kJ/kg TS. Os autores concluíram que a *Salvinia* foi a espécie que apresentou melhor rendimento, até mesmo sem pré-tratamento. A sonificação reduziu o tempo de adaptação microbiana (fase *lag*), mas não compensou energeticamente o custo do processo.

Outro trabalho que também avaliou o teste de potencial de biometano (BMP) em espécies de macrófitas foi o de Fujiwara et al. (2020). O objetivo do estudo foi investigar as variações sazonais na composição química e no potencial de produção de metano (BMP) de macrófitas submersas: *Egeria densa*, *Elodea nuttallii* e *Potamogeton maackianus*. A coleta foi realizada de junho a outubro de 2015, no Lago Biwa. As macrófitas foram secas a 80 °C e passaram por um processo de moagem (<3 mm). Os autores correlacionaram o potencial de produção de metano com as mudanças sazonais que afetariam o conteúdo de lignina e a composição das espécies colhidas. As espécies coletadas no verão apresentaram um melhor desempenho devido ao fato de possuírem alta digestibilidade.

Iweh et al. (2020) propuseram um sistema em série combinando digestão úmida e sólida, visando melhorar a recuperação de metano a partir de *Elodea nuttallii*. A digestão úmida ocorreu em estágio único com TDH de 30 e 15 dias. O sistema em série teve um TDH de 20,8 dias. Os autores concluíram que o sistema em série foi mais eficiente do que o sistema em estágio único devido a melhor degradação da estrutura lignocelulósica presentes nas macrófitas aquáticas.

Para avaliar a produção de metano Bhatia et al. (2020) aplicaram um pré-tratamento por explosão a vapor com 11 condições diferentes (120 a 210 °C e 10 a 60 min) gerando diferentes fatores de severidade. O substrato (*Ludwigia grandiflora*) foi coletado no Lago Biwa, Japão. O melhor rendimento foi obtido utilizando as condições 165 °C por 30 min (272,4 mL/g STV), o que representou um aumento de 3,2 vezes quando comparado ao substrato sem tratamento (85 mL/g STV). Os autores concluíram que por meio do pré-tratamento a hemicelulose foi degradada, tornando a celulose mais acessível. Temperaturas superiores a 165 °C inibiram a digestão anaeróbia devido a lignina solúvel e compostos fenólicos liberados no meio reacional.

Outras abordagens foram testadas para potencializar a produção de metano. Brown et al. (2020) fizeram a integração entre os processos de carbonização hidrotérmica e digestão anaeróbia. Foram avaliadas três estratégias: combustão do hidrochar e digestão da água do processo, digestão apenas do hidrochar, e digestão da lama total. Os autores relataram que o melhor desempenho foi obtido a partir da digestão da água de processo (213 mL/g STV). Além disso, outra conclusão obtida foi a de que quanto maior a temperatura do processo de carbonização térmica mais inibidores são formados, prejudicando o processo de digestão anaeróbia, e consequentemente, a produção de biometano. Entretanto, foi observada uma melhor produção de metano em temperaturas menores, até 150 °C. O trabalho de Dutra et al. (2021) teve como objetivo investigar o efeito de diferentes pré-tratamentos químicos (ácido e básico) na *Egeria densa* visando à produção de biogás (metano) por digestão anaeróbia e bio-óleo por pirólise. A biomassa foi coletada no Rio São Francisco. Foi escolhido um planejamento 2³ com variações em concentração (1-1,5%), tempo (0,5-1 h) e tipo de catalisador (H₂SO₄ ou NaOH). Os autores concluíram que o pré-tratamento alcalino resultou numa melhora na produção de metano, sendo mais eficaz que o ácido. Porém, o pré-tratamento ácido favorece a produção de bio-óleo via pirólise, por aumentar extrativos. Então, a escolha do pré-tratamento deve ser considerada dependendo do objetivo.

O efeito de nanopartículas de óxido de níquel (NiONPs) na produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de macrófitas aquáticas (*Pistia stratiotes* e *Potamogeton pectinatus*) com inóculo bacteriano proveniente de efluente municipal foi estudado por Salama et al. (2021). Os autores relataram que houve aumento na produção de biogás em concentração de NiONPs até 2 ppm e tempo de incubação até 30 dias. O aumento estaria correlacionado ao fato de pequenos traços de metais, como cobre (Co), níquel (Ni) e ferro (Fe), aumentarem a atividade bacteriana.

Anyanwu et al. (2022) investigaram a utilização de macrófitas aquáticas (*Sipogyra porticalis* e *Nymphaea alba* Linn) na produção de biodiesel, bioetanol e biogás e compararam com outros insumos, como casca de arroz e biochar. A coleta das macrófitas ocorreu no lago em Ndufu Echara, estado de Ebonyi, Nigéria. As biomassas foram coletadas, secas e trituradas. A espécie *Nymphaea alba* Linn apresentou rendimento superior a *Sipogyra porticalis*. Os autores justificaram o resultado devido a espécie conter um menor teor de lignina e uma maior relação C/N, favorecendo assim a atividade microbiana.

Bray et al. (2022) conduziram o estudo em dois biodigestores em diferentes vilarejos na Índia. Os autores buscavam substituir o gás liquefeito de petróleo (GLP) pelo biogás produzido no processo em comunidades locais. Foram testadas três abordagens de pré-tratamento: sem pré-tratamento; com pré-tratamento mecânico (triturado em pasta); e pré-tratamento combinado

(mecânico e químico com KOH). Além disso, uma análise econômica foi realizada para prever o potencial de biogás em sistemas reais. Os autores relataram que o pré-tratamento combinado aumentou o rendimento de biogás, comparado as outras abordagens. E que pela análise econômica a venda do digestato com fertilizante poderia melhorar a viabilidade financeira.

3.2.6. Produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas

A Tabela 6 apresenta, de forma resumida, as principais informações dos trabalhos da sessão 3.2.5 que empregam macrófitas aquáticas para a produção de biogás a partir do processo de digestão anaeróbia.

Tabela 6 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continua).

#	Substrato	Reator	Principais condições	Rendimento de CH ₄	Referência
1	<i>Gracilaria tikvahiae</i> , <i>Ulva sp.</i> e <i>Sargassum fluitans</i>	Frasco Nalgene® de 2 L	T: 28 ± 3 °C pH: 6,8-7,5 (ajustado com NaOH no início) Agitação: não houve TDH: 20, 30, 40 e 50 dias Inóculo: lodo de digestor anaeróbio	0,23 L/g STV	(HABIG; RYTHER, 1983)
2	<i>Lemna</i> , <i>Hydrocotyle</i> e <i>Eichhornia crassipers</i>	Plug flow ou PFR de 0,2 e 1 m ³	T: 14-29 °C pH: NR Agitação: NR TDH: 10 a 40 dias Inóculo: esterco de gado	0,27 m ³ /kg STV	(LINCOLN et al., 1986)
3	<i>Azolla pinnata</i> , <i>Eichhornia crassipers</i> e <i>Hydrilla verticillata</i>	Frasco de vidro de 5 L	T: 18-22°C (inverno), 26-36 °C (verão) e 26-30 °C (período de chuvas) pH: 7,42 ± 0,06 (inverno), 7,82 ± 0,29 (verão) e 7,35 ± 0,19 (período de chuvas) Agitação: NR TDH: NR Inóculo: lodo de digestor anaeróbio	NR	(TAHERUZZAMAN; KUSHARI, 1989)
4	Caules de quinoa, totora (<i>Schoenoplectus tatora</i>) e outras espécies de macrófitas, esterco de lhama, vaca e ovelha,	Digestor de aço inoxidável de 2 L	T: 25 ± 1 °C pH: 7,4 Agitação: NR TDH: 30 dias Inóculo: esterco de lhama, vaca e ovelha	0,192 m ³ /kg STV	(ALVAREZ; LIDÉN, 2008)

CSTR, reator de mistura perfeita; NR, não reportado; PFR, reator de fluxo de pistão; STV, sólidos totais voláteis; TDH, tempo de detenção hidráulica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 7 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).

#	Substrato	Reator	Principais condições	Rendimento de CH ₄	Referência
5	Jacinto-de-água, cabomba e salvinia	Digestor de aço inoxidável 316 de 200 L	T: 38 °C pH: 7,0-8,0 Agitação: intermitente TDH: 31 dias Inóculo: esterco bovino	267 L/kg STV	(O’SULLIVAN et al., 2010)
6	<i>Eichhornia crassipers</i>	Plug flow ou PFR de 30 L	T: 35 °C pH: 6,8 Agitação: intermitente TDH: 12 e 16 dias Inóculo: esterco bovino	0,307 L/g STV	(NAVARRO; RUBIO; MALDONADO, 2012)
7	<i>Eichhornia crassipers</i>	Bioreator de 50 L	T: 20-30 °C (estação chuvosa) e 30-39 °C (estação seca) pH: NR Agitação: NR TDH: 11 e 40 dias Inóculo: rúmen bovino	NR	(ADELEYE; ADDETUNJI; BAMGBOYE, 2013)
8	Algas filamentosas, lentilhas-d’água, Azolla filiculoides, Hydrocotyle ranunculoides e Ludwigia hexapetala	Reator de fluxo vertical misto 5,3 m ³	T: 35 °C pH: 4,6 (alimentação) e 7,1-7,4 (digestato) Agitação: mistura por circulação contínua TDH: 60 dias Inóculo: NR	0,53 m ³ /kg STV	(COHEN et al., 2013)
9	<i>Ceratophyllum demersum</i> , <i>Egeria densa</i> , <i>Elodea nuttallii</i> , <i>Potamogeton maackianus</i> e <i>Potamogeton malaianus</i>	Frasco de vidro de 500 mL	T: 37 ± 1 °C pH: NR Agitação: 100 rpm TDH: 14 dias Inóculo: lodo anaeróbio mesofílico	360,8 mL/g STV	(KOYAMA et al., 2014)
10	<i>Ceratophyllum demersum</i>	Frasco de vidro de 100 mL	T: 37 °C pH: NR Agitação: NR TDH: 30 dias Inóculo: lodo de digestor anaeróbio	554 L/kg STV	(PASTARE et al., 2014)
11	<i>Potamogeton maackianus</i> e <i>Egeria densa</i>	Frasco de vidro 500 mL	T: 37 ± 1 °C pH: NR Agitação: 100 rpm TDH: 14 dias Inóculo: lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto	243 mL/g STV	(KOYAMA et al., 2015)

CSTR, reator de mistura perfeita; NR, não reportado; PFR, reator de fluxo de pistão; STV, sólidos totais voláteis; TDH, tempo de detenção hidráulica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 8 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).

#	Substrato	Reator	Principais condições	Rendimento de CH ₄	Referência
12	<i>P. maackianus</i>	Frasco de 500 mL	T: 37 °C pH: NR Agitação: intermitente TDH: 14 dias Inóculo: lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto	NR	(KOYAMA et al., 2017a)
13	<i>P. maackianus</i>	CSTR de 4,5 L	T: 37 e 55 °C pH: NR Agitação: 100 rpm TDH: 40 dias Inóculo: lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto	259,7 mL/g STV	(KOYAMA et al., 2017b)
14	<i>Potamogeton maackianus</i> e resíduos alimentares acidificados	Frasco de 500 mL	T: 37 ± 1 °C pH: 10,0 Agitação: 100 rpm TDH: 17 dias Inóculo: lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto	274,8 mL/g STV	(KOYAMA et al., 2017c)
15	<i>Elodea nuttallii</i> , <i>Glyceria fluitans</i> , <i>Phragmites australis</i>	Frasco de vidro de 500 mL	T: 38 ± 1 °C pH: NR Agitação: sem agitação TDH: até cessar produção de gás Inóculo: digestado de planta experimental, esterco bovino e silagem	372 L/kg STV	(MOELLER et al., 2018)
16	<i>E. nuttallii</i>	NR	T: 37 °C pH: NR Agitação: manual uma vez por dia TDH: até a produção de biogás ser < 1% em 5 dias consecutivos Inóculo: digestado de planta experimental, esterco bovino e silagem	257,5 mL/g STV	(STABENAU et al., 2018)
17	<i>Elodea nuttallii</i> e <i>Elodea canadensis</i>	NR	T: 38 °C pH: NR Agitação: NR TDH: até a estabilização da produção (< 1% em 5 dias)	242,2 mL/g STV	(GALLEGOS et al., 2018)
18	<i>Elodea</i>	CSTR de 40 L	T: 38 °C pH: entre 8,0 e 7,4 Agitação: 65 rpm TDH: 100 dias (fase 1 e 3) e 30 dias (fase 2) Inóculo: digestato de planta agrícola (esterco bovinos, silagem milho, silagem de grãos)	259 mL/g STV·d	(BAUER et al., 2018)
19	<i>Elodea nuttallii</i> e <i>Myriophyllum heterophyllum</i>	NR	T: 38 °C pH: 4,9 a 6,5 Agitação: NR TDH: 103 dias Inóculo: lodo de planta de biogás	228 mL/g STV	(ZEHNSDORF et al., 2018)

CSTR, reator de mistura perfeita; NR, não reportado; PFR, reator de fluxo de pistão; STV, sólidos totais voláteis; TDH, tempo de detenção hidráulica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 9 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).

#	Substrato	Reator	Principais condições	Rendimento de CH ₄	Referência
20	<i>Ulva lactuca</i>	Frasco de vidro de 130 mL	T: 37 °C pH: NR Agitação: NR TDH: até cessar a produção de metano Inóculo: digestato de reator contínuo com esterco bovino	408 mL/g STV	(MHATRE et al., 2019)
21	<i>Eichhornia crassipers</i> e <i>Pistia stratiotes</i>	Microbiodigestor em tereftala de polietileno (PET) de 600 mL	T: 33 °C pH: NR Agitação: NR TDH: 30 dias Inóculo: lodo anaeróbio oriundo de reator UASB de frigorífico bovino	1,86 L/mg STV	(FERNANDES et al., 2019)
22	<i>Cerathophyllum demersum</i> , <i>Fucus vesiculosus</i> , <i>Ulva intestinalis</i> e esterco de bovino	Tanque de digestão de 500 m ³	T: 38 °C pH: NR Agitação: NR TDH: NR Inóculo: esterco bovino	405,3 L/kg STV	(PASTARE; ROMAGNOLI, 2019)
23	<i>Eichhornia crassipers</i> , <i>Pistia stratiotes</i> e <i>Salvinia molesta</i>	Frasco de 160 mL	T: 35 °C pH: NR Agitação: NR TDH: até a estabilização (produção < 1% diária) Inóculo: lodo anaeróbio de ETE municipal	432 mL/g STV	(KIST et al., 2020)
24	<i>E. densa</i> , <i>E. nuttallii</i> e <i>Potamogeton maackianus</i>	Frasco de 500 mL	T: 37 ± 1 °C pH: NR Agitação: NR TDH: 14 dias Inóculo: lodo anaeróbio de ETE municipal	284 mL/kg STV	(FUJIWARA et al., 2020)
25	<i>Elodea nuttallii</i>	Frasco de vidro 3 L e contêiner digestor 2,2 L	T: 37 ± 1 °C pH: entre 7,0 e 8,0 Agitação: 100 rpm TDH: 15 e 30 dias Inóculo: lodo anaeróbico	299 mL/g STV	(IWEH et al., 2020)
CSTR, reator de mistura perfeita; NR, não reportado; PFR, reator de fluxo de pistão; STV, sólidos totais voláteis; TDH, tempo de detenção hidráulica.					

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 10 – Comparação entre parâmetros na produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas (continuação).

#	Substrato	Reator	Principais condições	Rendimento de CH ₄	Referência
26	<i>Ludwigia grandiflora</i>	Frasco de 500 mL	T: 37 ± 1 °C pH: NR Agitação: NR TDH: 20 dias Inóculo: lodo mesofílico de ETE doméstica	272,4 mL/g STV	(BHATIA et al., 2020)
27	<i>Eichhornia crassipes</i>	Frasco de 500 mL	T: 37° C pH: NR Agitação: 60 s a cada 10 min TDH: 30 dias Inóculo: lodo de ETE municipal	213,4 mL/g STV	(BROWN et al., 2020)
28	<i>Egeria densa</i>	Frasco de 115 mL	T: 35 ± 1 °C pH: 7,0 Agitação: 115 rpm TDH: 20 dias Inóculo: NR	231,82 mL/g STV	(DUTRA et al., 2021)
29	<i>Pistia stratiotes</i> e <i>Potamogeton pectinatus</i>	Biorreator de 20 mL	T: 35 °C pH: 7,2 Agitação: NR TDH: 40 dias Inóculo: culturas bacterianas (<i>P. alcalifaciens</i> e <i>A. aquatilis</i>) de esgoto	42,90 mL/3,4 g (<i>P. stratiotes</i>) com 2 ppm NiONPs	(SALAMA et al., 2021)
30	<i>Sipogyra porticalis</i> e <i>Nymphaea alba</i> Linn	Digestor de aço inoxidável de 3 L	T: 30 ± 2 °C pH: NR Agitação: NR TDH: 30 dias Inóculo: NR	NR	(ANYANWU et al., 2022)
31	<i>Eichhornia crassipers</i>	200 L	T: temperatura ambiente (30-40 °C) pH: entre 6,5 e 7,5 Agitação: NR THD: 30 dias Inóculo: esterco de vaca fresco	339,5 L/kg STV	(BRAY et al., 2022)

CSTR, reator de mistura perfeita; NR, não reportado; PFR, reator de fluxo de pistão; STV, sólidos totais voláteis; TDH, tempo de detenção hidráulica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3. Consideração a respeito da revisão bibliométrica

Com base nos 1.212 artigos publicados, durante o período entre 1976 e 2023, no banco de dados Scopus, a revisão bibliométrica forneceu uma visão geral sobre os trabalhos acerca da digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas, apontando tendências mundiais da pesquisa sobre o tema. De acordo com o levantamento bibliométrico, foi possível concluir que:

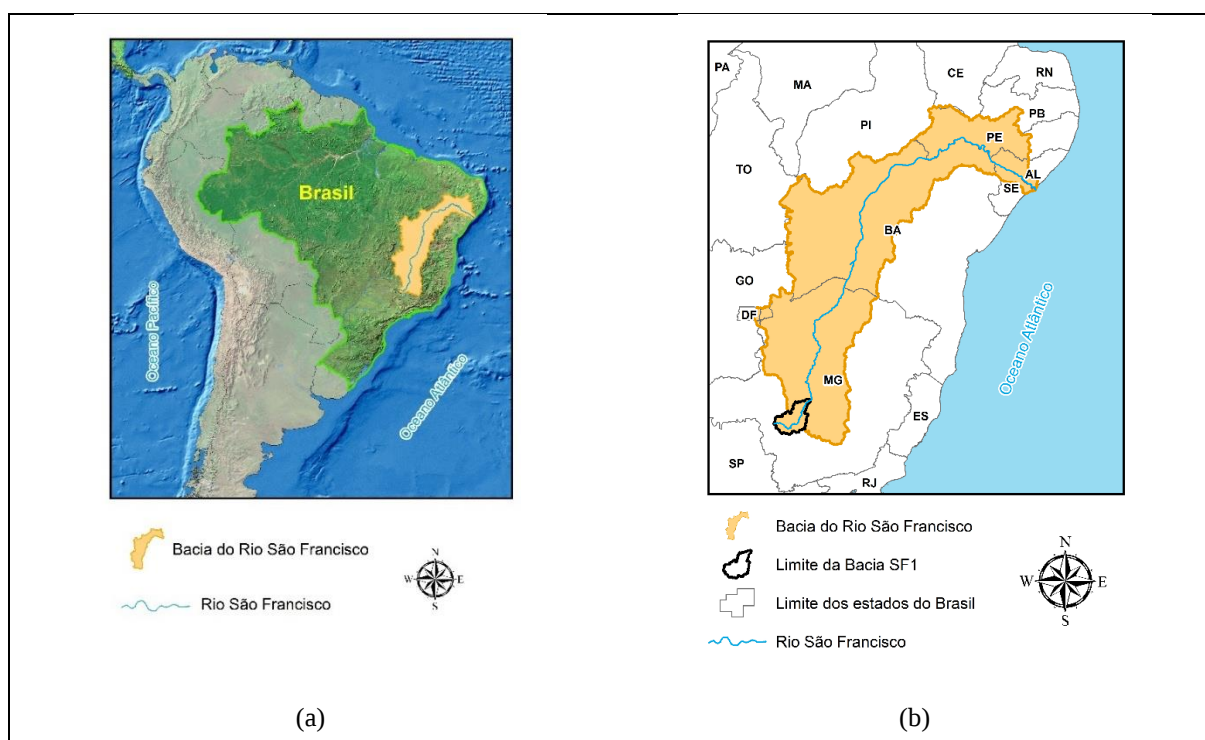
- O crescimento das publicações aumentou nas últimas duas décadas e a tendência é que o número de artigos publicados cresça nos próximos anos;
- O financiamento de novos estudos, a preocupação por soluções para diversos problemas ambientais, inovações metodológicas e avanços científicos impulsionaram o aumento do número de publicações;
- O Brasil ocupa o quarto lugar na lista de países que publicaram o maior número de artigos sobre digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas, atrás somente de China, Índia e Estados Unidos. Os quatro países foram responsáveis por 34,52% dos artigos publicados. Quanto à colaboração internacional, os grupos de pesquisa da China, Estados Unidos e Austrália foram os que mais trabalharam em conjunto;
- Na lista dos dez países que mais publicaram artigos sobre o tema encontramos tanto países emergentes (Brasil, China e Índia) como países desenvolvidos (Alemanha, Austrália, Canadá, Espanha, Estados Unidos, Itália e Reino Unido). Isto acontece, pois as macrófitas são encontradas em ecossistemas como lagos, rios e pântanos, e seu crescimento desordenado está relacionado aos altos índices de nutrientes e pode causar diversos prejuízos econômicos e ambientais;
- Além do interesse em produzir biogás a partir do tratamento anaeróbio, os trabalhos também avaliaram a remoção de poluentes, purificação da água e aproveitamento do efluente como fertilizante. Apesar alguns trabalhos apresentarem viés industrial, a grande parte foi desenvolvida em escala de bancada.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Rio São Francisco

O Rio São Francisco é uma bacia hidrográfica que corresponde a 8% do território nacional, com 2.863 km de extensão e 639.219 km² de área de drenagem. O rio nasce na Serra da Canastra, no estado de Minas Gerais, e deságua na divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe (Figura 11). Ao todo, percorre 505 municípios, em seis estados (Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe), além do Distrito Federal, nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do Brasil. O Rio São Francisco, chamado popularmente de “Velho Chico”, é dividido em quatro zonas ou regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (CBHSF, 2018; PDRH SF1, 2021).

Figura 11 – (a) Mapa do Brasil e (b) Mapa da Bacia do Rio São Francisco.

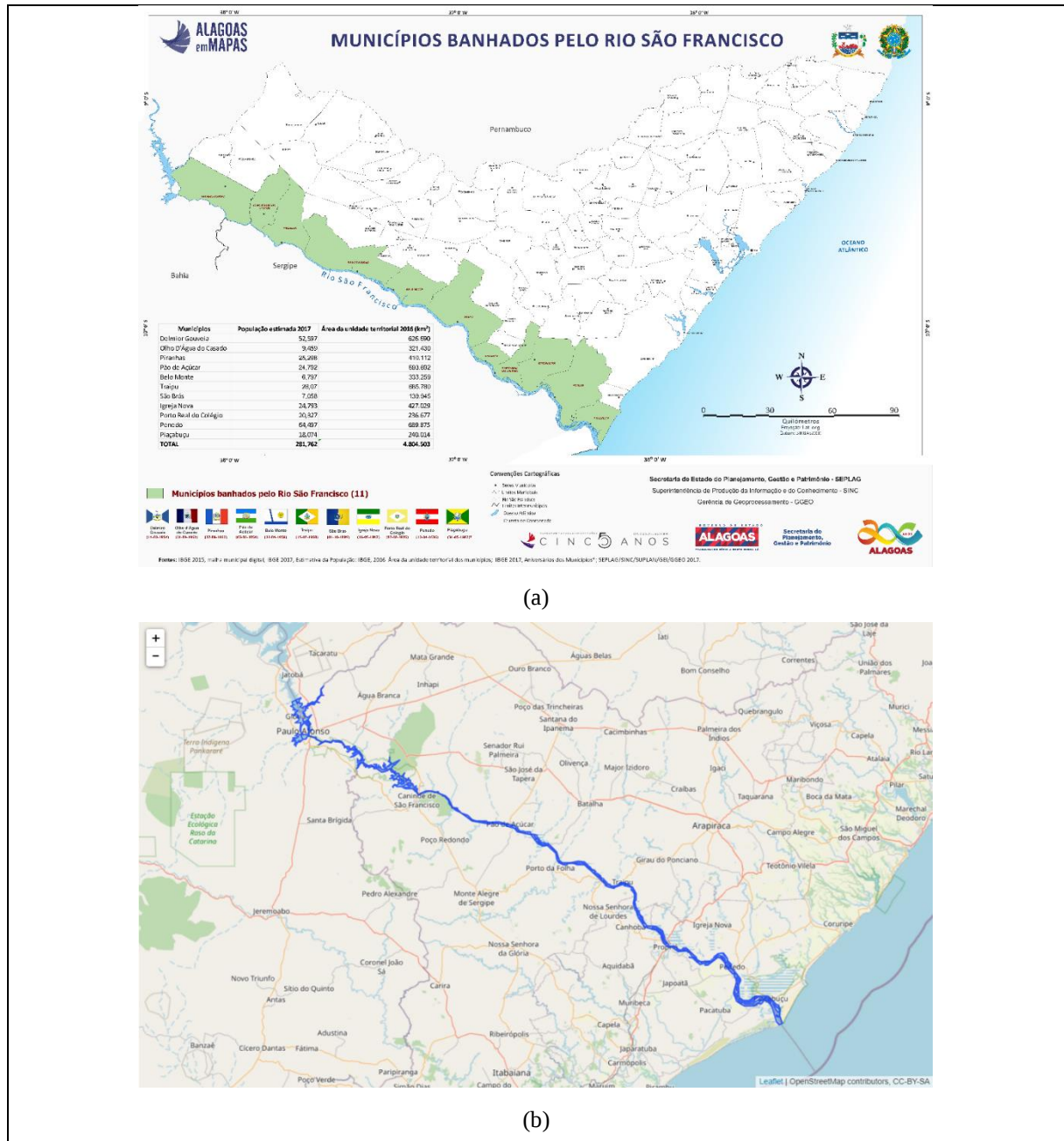


Fonte: PDRH SF1 (2022)

No estado de Alagoas, o Rio São Francisco banha 11 municípios: Delmiro Gouveia, Olho D'Água do Casado, Piranhas, Pão de Açúcar, Belo Monte, Traipu, São Brás, Igreja Nova, Porto Real do Colégio, Penedo e Piaçabuçu (Figura 12). Sua presença possibilita o desenvolvimento de diversos setores, como agricultura, piscicultura, turismo, geração de

energia e abastecimento hídrico. O desenvolvimento promove a integração regional e melhora a qualidade de vida das populações ribeirinhas. A gestão sustentável de seus recursos é essencial para garantir que continue a ser um vetor de desenvolvimento para o estado (PORTAL ALAGOAS EM DADOS, 2019, 2023).

Figura 12 – (a) Municípios banhados pelo rio São Francisco no estado de Alagoas e (b) Rio São Francisco em Alagoas.



Fonte: (a) Portal Alagoas em Dados (2019) e (b) Portal Alagoas em Dados (2023)

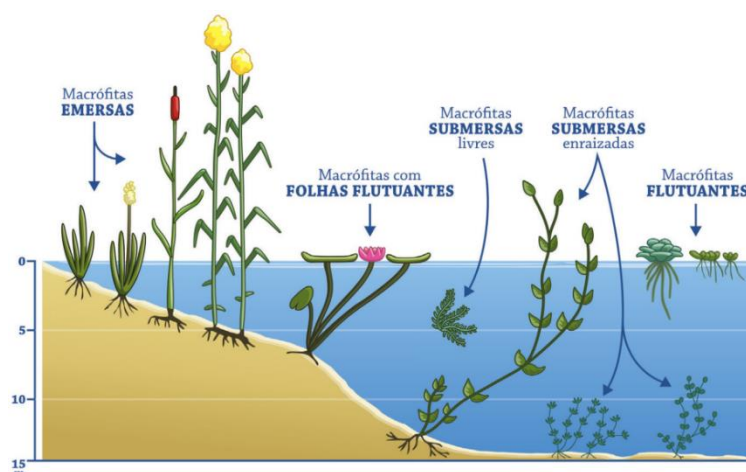
O Rio São Francisco possui uma rica biodiversidade, abrangendo quatro biomas (caatinga, cerrado, mata atlântica e o ecossistema estuarino do próprio rio) e abrigando diversas espécies aquáticas. Além de sua relevância ambiental, o rio tem grande importância econômica, sendo fonte de irrigação para a agricultura, gerador de energia em usinas hidrelétricas (como Sobradinho, Paulo Afonso e Xingó) e um recurso essencial para a pesca. Entretanto, o rio vem enfrentando problemas devido à poluição, desmatamento e projetos de irrigação que alteram o seu curso natural.

4.2. Macrófitas aquáticas

As macrófitas são plantas aquáticas que podem apresentar em sua estrutura folhas, caules e raízes, assim como as plantas terrestres. Elas se diferenciam das algas por possuírem um sistema vascularizado, que permite a condução de água e nutrientes, raízes verdadeiras e células individuais que são independentes e indiferenciadas. Além disso, diferente das algas, as macrófitas são encontradas apenas em águas rasas de lagos, rios e pântanos (BOWDEN; GLIME; RIIS, 2007).

A classificação se dá pela forma de crescimento e o tipo de habitat. As macrófitas de água doce são classificadas como: plantas emergentes, plantas de folhas flutuantes, plantas submersas e plantas flutuantes livres (Figura 13). Entretanto, essa classificação é comumente usada para rios grandes e rios com fortes conexões de planícies de inundação. Para sistemas menores é utilizada outra classificação devido a limitação de espécies de folhas flutuantes (Tabela 11) (FRAGOSO; MARQUES; FERREIRA, 2009; SCULTHORPE, 1967).

Figura 13 – Grupos ecológicos das macrófitas.



Fonte: Fragoso, Marque e Ferreira (2009)

Tabela 11 – Classificação das macrófitas.

Plantas aquáticas	Características	Espécie
Plantas emergentes	Geralmente, plantas eretas acima da superfície da água, com algumas espécies tolerando submersão; todas produzem órgãos reprodutivos aéreos.	Taboa (<i>Typha spp.</i>) e junco (<i>Juncus spp.</i>)
Plantas de folhas flutuantes	Plantas permanentemente submersas que produzem folhas flutuantes com morfologia distinta das folhas submersas em águas calmas ou de fluxo lento; produzem órgãos reprodutivos flutuantes ou aéreos.	Ninféia (<i>Nymphaea spp.</i>) e vitória-régia (<i>Victoria amazonica</i>)
Plantas submersas	Plantas permanentemente submersas; produzem órgãos reprodutivos flutuantes, aéreos ou submersos.	Elódea (<i>Elodea spp.</i>) e cabomba (<i>Cabomba spp.</i>)
Plantas flutuantes livres	Plantas não presas ao substrato; produzem órgãos reprodutivos flutuantes, aéreos ou submersos.	Aguapé (<i>Eichhornia crassipes</i>) e alface-d'água (<i>Pistia stratiotes</i>)
Macrófitas de riacho	Características	
Plantas submersas obrigatórias	Similar as plantas submersas, mas também inclui as plantas de folhas flutuantes	Elodea (<i>Egeria densa</i>) e Milfolhas d'água (<i>Myriophyllum spicatum</i>)
Plantas anfíbias	Parte das plantas emergentes; capazes de viver em terra, bem como emergidas e submersas; algumas desenvolvem formas aquáticas.	<i>Sagittaria montevidensis</i> e <i>Pontederia cordata</i>
Plantas terrestres	Geralmente, presentes em terra; ocasionalmente em riachos; não vivem permanentemente submersas; nunca desenvolvem formas aquáticas.	Bucho (<i>Typha latifolia</i>) e papiro (<i>Cyperus papyrus</i>)

Fonte: Elaborado pelo autor – Adaptado de Sulthorpe (1967)

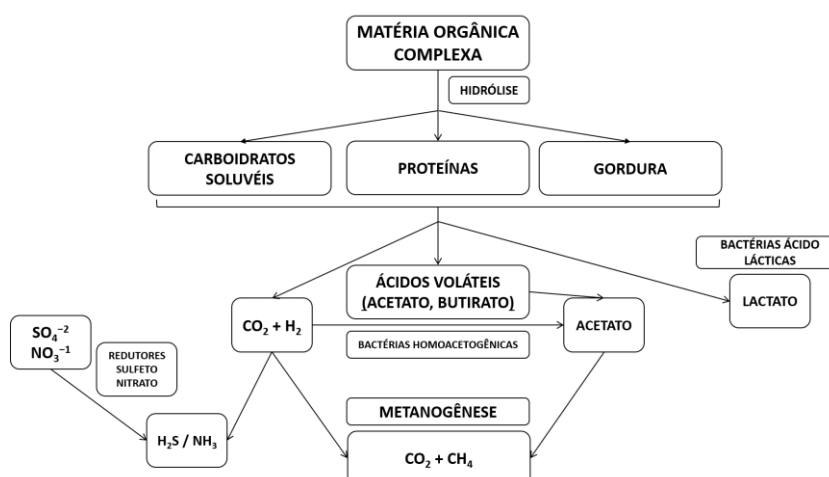
A estrutura e função dos ecossistemas aquáticos como lagos, rios e pântanos são diretamente influenciadas pela presença das macrófitas. Elas desempenham papel importante na reciclagem de nutrientes e metais potencialmente tóxicos, refúgio e alimento para a fauna nativa, proteção das margens e regulação do ciclo hidrológico. Entretanto, altos índices de nutrientes, seja por processos naturais ou por escoamento urbano ou agrícola, favorecem o crescimento desenfreado dessas plantas aquáticas, podendo provocar um desequilíbrio no ecossistema, levando até mesmo a sua falência (BOYD, 1970; DHOTE; DIXIT, 2009).

Koyama et al. (2014), Moeller et al. (2018) e Stabenau et al. (2018) relatam que o crescimento descontrolado de plantas aquáticas em corpos d'água atrapalha o tráfego de embarcações prejudicando atividades de lazer, pesca e esportes aquáticos. Em usinas hidroelétricas, o acúmulo em frente à entrada das turbinas representa risco à operação eficiente e segura, podendo reduzir a capacidade de geração de energia. Além disso, a presença de grande quantidade de plantas aquáticas pode causar estagnação da água, mau cheiro, mudança de ecossistema e poluição da paisagem.

4.3. Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo que ocorre em etapas sequenciais e envolve a atuação de três grupos principais de microrganismos. Primeiramente, as bactérias fermentativas, também conhecidas como acidogênicas, desempenham um papel fundamental ao converter, por meio de hidrólise e fermentação, compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em compostos mais simples (ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono). Em seguida, as bactérias sintróficas, ou acetogênicas, transformam compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, os microrganismos metanogênicos realizam a conversão do acetato e do hidrogênio em metano e dióxido de carbono, completando assim o ciclo da digestão anaeróbia (Figura 14) (CHERNICHARO, 2007).

Figura 14 – Vias metabólicas e comunidades microbianas envolvidas na digestão anaeróbia.



Fonte: Elaborado pelo autor – Adaptado de Chernicharo (2007)

O processo de conversão da matéria orgânica complexa, em condições anaeróbias, pode ser representado de uma forma simples e geral, através da Equação 1, contendo apenas o produto das etapas intermediárias (VON SPERLING, 1996).



4.3.1. Hidrólise e Acidogênese

A primeira etapa desse processo envolve a degradação ou hidrólise dos materiais complexos presentes no substrato, transformando-os em substâncias dissolvidas mais simples que podem ser absorvidas pelas paredes celulares das bactérias fermentativas. Essa conversão dos compostos complexos em formas mais simples é realizada por meio da ação de exoenzimas secretadas pelas bactérias (DAS; VEZIROGLU, 2001; PARKIN; OWEN, 1986).

4.3.2. Acetogênese

Nesta etapa, as bactérias sintróficas acetogênicas desempenham um papel de oxidar compostos intermediários, como propionato e butirato, convertendo-os em substratos adequados para a fase subsequente do processo. Os produtos resultantes dessa oxidação incluem acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (AQUINO; CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2007).

4.3.3. Metanogênese

Os compostos orgânicos gerados na etapa anterior são convertidos por microrganismos metanogênicos em metano e dióxido de carbono. A produção de metano ocorre através da ação de dois grupos de arqueas metanogênicas:

(a) Metanogênicas acetoclásticas

Este grupo é responsável pela formação de metano a partir do acetato, contribuindo com aproximadamente 60 a 70% de toda a produção de metano. Estas arqueas apresentam um tempo mínimo de duplicação variando entre 2 e 3 dias e desempenham um papel importante no

controle do pH durante a fermentação, ao remover ácido acético e promover a formação de dióxido de carbono (Equação 2) (CHERNICHARO, 2007; OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).



(b) Metanogênicas hidrogenotróficas

Este grupo é responsável pela formação de metano a partir do hidrogênio e dióxido de carbono. Estas arqueas apresentam um tempo mínimo de duplicação de cerca de 6 dias e desempenham um papel importante na regulação do potencial redox durante o processo de digestão anaeróbia, influenciando tanto a taxa global de produção de ácidos quanto a composição dos ácidos gerados pelos microrganismos formadores de ácido (Equação 3) (CHERNICHARO, 2007; OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).



4.3.4. Sulfetogênese

Nesta etapa, compostos como sulfato, sulfito e outros derivados sulfurados são reduzidos a sulfeto, por meio da ação de grupos de bactérias redutoras de sulfato. Embora esse processo apresente uma maior eficiência na remoção da demanda química de oxigênio (DQO) em comparação com a metanogênese, ele resulta na produção de gás sulfídrico, um composto corrosivo, com odor desagradável e potencialmente tóxico ao meio ambiente (CHERNICHARO, 2007).

4.4. Planejamento experimental

A aplicação do planejamento tem como objetivo extrair o máximo de informações do sistema em estudo, fazendo uso de princípios estatísticos, otimizando combinações, análise de interação e generalização dos resultados. Ou seja, determinar a interação entre variáveis de forma racional e econômica (BARROS; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Alvarez e Lidén (2008) aplicaram no trabalho um planejamento fatorial baseado em um design simplex-centroid. Este tipo de planejamento é uma técnica estatística utilizada para otimizar misturas, especialmente quando o interesse está na proporção dos componentes e não

em suas quantidades absolutas. Os pontos experimentais são distribuídos ao longo de um simplex (por exemplo, um triângulo para três componentes ou um tetraedro para quatro), abrangendo todas as possíveis combinações das proporções dos componentes. Os pontos incluem misturas puras (100% de um único componente), misturas binárias equilibradas (50%-50%), misturas ternárias equilibradas, e assim por diante, garantindo uma cobertura uniforme do espaço experimental.

Dutra et al. (2021) utilizou um planejamento fatorial 2^3 no trabalho. Este tipo de planejamento estuda três fatores, cada um em dois níveis (codificados como -1 e +1) e permite avaliar os efeitos principais de cada fator, bem como suas interações. Ele é útil para identificar quais variáveis influenciam significativamente a resposta do sistema e como elas interagem entre si. A análise dos resultados pode ser feita por meio de ANOVA (Análise de Variância) e superfícies de resposta, permitindo otimizar processos e entender melhor os efeitos das variáveis testadas.

O presente trabalho também envolve a elaboração de uma abordagem metodológica mediante a técnica estatística de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) a fim de investigar as melhores condições de geração de biometano, como subproduto de valor agregado.

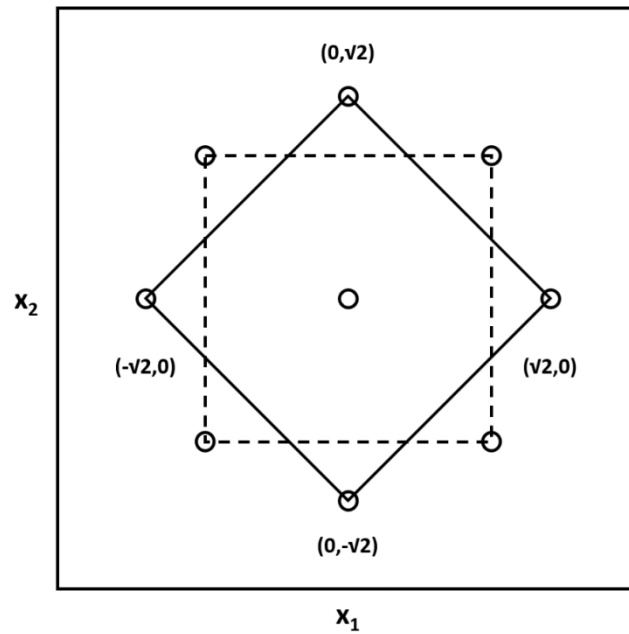
O DCCR é composto por três pontos: fatoriais (correspondem a um planejamento fatorial completo), axiais (estendidos além dos níveis fatoriais para capturar curvaturas na resposta) e central (usado para avaliar a repetibilidade e detectar efeitos não lineares). Foram estudados dois fatores A (concentração de substrato) e B (salinidade do meio) com cinco níveis cada ($-\sqrt{2}$, -1, 0, 1, $\sqrt{2}$). A matriz com os valores codificados e a representação do planejamento estão dispostas na Tabela 12 e Figura 15, respectivamente.

Tabela 12 – Matriz experimental com valores codificados.

Ensaio	A	B
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1
5	$-\sqrt{2}$	0
6	$\sqrt{2}$	0
7	0	$-\sqrt{2}$
8	0	$\sqrt{2}$
9	0	0
10	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 15 – Planejamento para duas variáveis codificadas, correspondentes à Tabela 11.



Fonte: Elaborado pelo autor – Adaptado de Barros, Scarminio e Bruns (2001)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

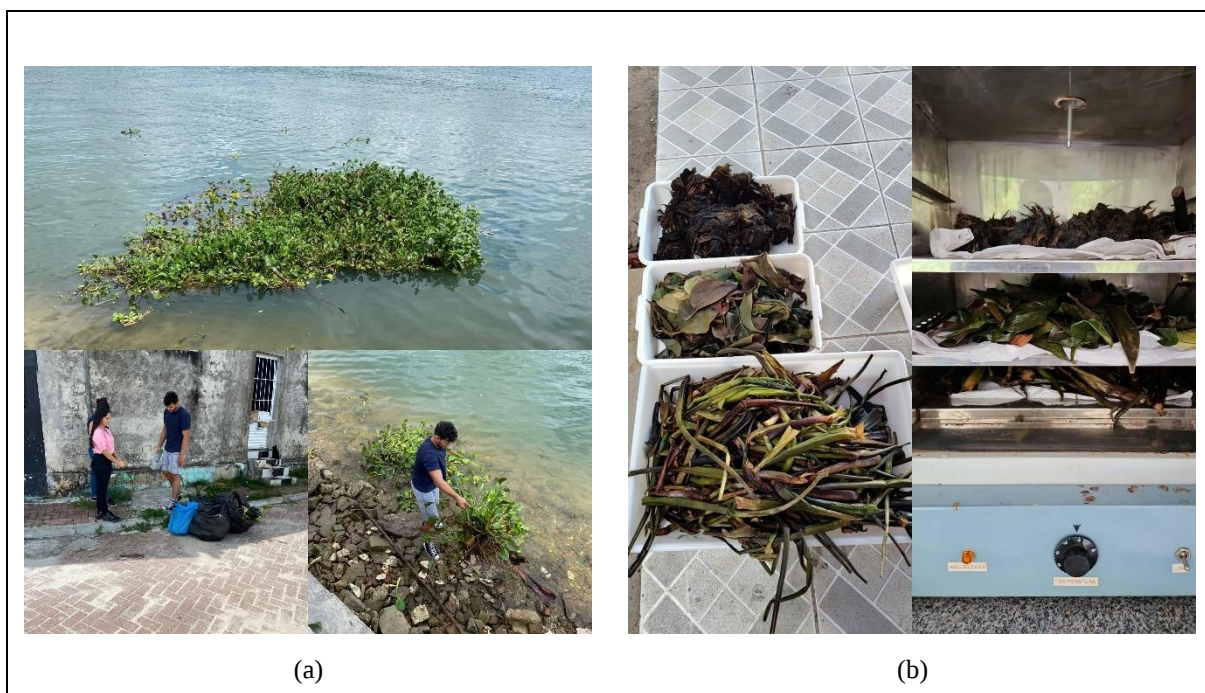
5.1. Materiais

A produção de biometano a partir de macrófitas aquáticas foi monitorada no Laboratório de Controle Ambiental (LCA) e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), ambos localizados no Centro de Tecnologia da UFAL.

5.1.1. Macrófitas aquáticas

As macrófitas aquáticas (*Eichhornia crassipes*) foram coletadas nas margens do Rio São Francisco, no município de Piaçabuçu, Alagoas (Figura 16a). As macrófitas foram lavadas e depois submetidas a um processo de secagem sob uma temperatura de 65 °C por 72 h, para remoção de 50 a 90% da água. Posteriormente, foram trituradas por um liquidificador de alta rotação industrial 2 L METVISA modelo LAR2220CC5 (Figura 16b). Os procedimentos foram realizados com o intuito de reduzir o volume e facilitar a digestão.

Figura 16 – (a) Coleta das macrófitas aquáticas em Piaçabuçu, Alagoas e (b) Separação e secagem da biomassa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.1.2. Lodo granular

O lodo granular, oriundo de um reator UASB, foi coletado de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de um condomínio residencial, localizado no bairro Tabuleiro do Martins, em Maceió, Alagoas. A caracterização do lodo granular é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Caracterização do lodo granular.

Parâmetros	Valores
pH	6,38
ST	30 g/L
STF	6 g/L
STV	24 g/L

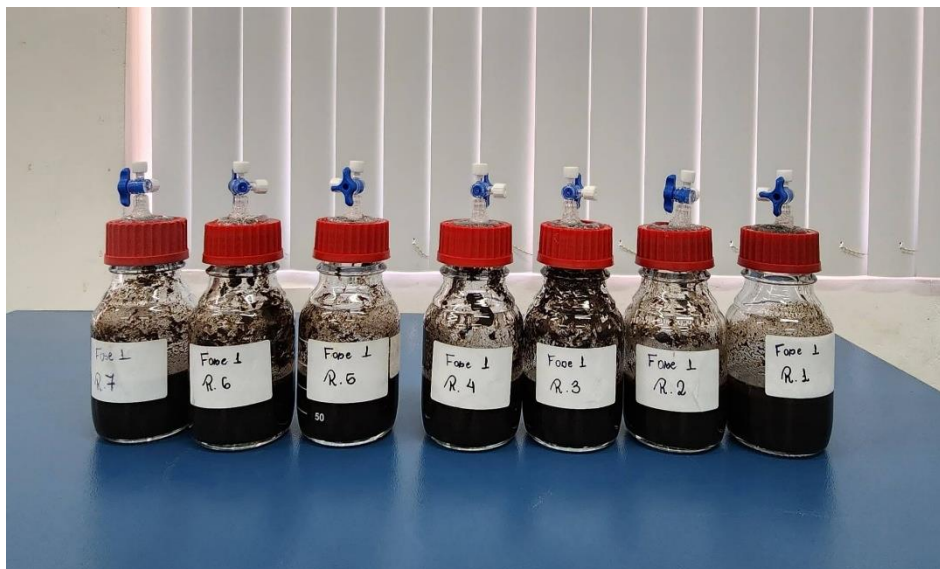
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2. Procedimento experimental

O estudo foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foi conduzido um estudo para avaliar a possibilidade de geração de biometano a partir das macrófitas aquáticas. A fermentação anaeróbia, foi realizada em reatores de 1.000 mL, com volume reacional igual a 500 mL, concentração de substrato de 5 g/100 mL e 0 g/L de salinidade do meio. O estudo foi realizado em duplicata.

Na segunda etapa, o estudo das variáveis foi realizado por com o auxílio da técnica de planejamento estatístico do tipo DCCR a fim de investigar as melhores condições de geração de biometano. A fermentação anaeróbia, foi realizada em reatores de 250 mL, com volume reacional igual a 125 mL (Figura 17). Neste planejamento foram consideradas duas variáveis (concentração de substrato e salinidade do meio) resultando em 9 experimentos distintos, onde apenas o ponto central foi realizado em triplicata, totalizando 11 reações (Tabela 14).

Figura 17 – Reatores anaeróbios utilizados na segunda etapa do estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 14 – Efeitos e níveis escolhidos no planejamento fatorial aplicado.

Variáveis	Efeitos estudados	Unidade	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
A	Concentração de substrato	g/100 mL de solução	7	8	10	12	13
B	Salinidade do meio	g/L	0	3	10	17	20

Fonte – Elaborado pelo autor, 2024.

Os intervalos das variáveis foram determinados tomando como base os relatórios da Expedição do Baixo São Francisco publicados (CBHFS, 2013). A Tabela 15 apresenta a matriz experimental para o planejamento fatorial. Além disso, A representa a concentração de substrato; e B a salinidade do meio.

Em ambas as etapas os reatores foram mantidos sob uma temperatura de $35 \pm 1^\circ\text{C}$ e rotação de 120 rpm, por uma câmara incubadora refrigerada com agitação orbital (shaker) MARCONI modelo MA830. O lodo granular foi adicionado como inóculo. O pH inicial foi ajustado manualmente para 7,0 utilizando 1 M NaOH e 1 M HCl. O volume útil do reator foi constituído por 25% de inóculo e 75% de água destilada, sendo o substrato incorporada no meio reacional de acordo com cada concentração previamente estabelecida. Além disso, adicionou-se em cada reator 1,5 g/L de NaHCO_3 , a fim de evitar variações no pH. Posteriormente, o *headspace* dos reatores foi borbulhado com N_2 (g) por um período de 3 minutos, sendo

hermeticamente vedados com lacre de plástico e septos de borracha, com o intuito de tornar o meio reacional anaeróbio.

Tabela 15 – Matriz experimental para planejamento 2² com pontos centrais e axiais.

Ensaio	A	B
1	8	3
2	8	17
3	12	3
4	12	17
5	7	10
6	13	10
7	10	0
8	10	20
9	10	10
10	10	10
11	10	10

A (concentração de biomassa) e B (salinidade do meio).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os parâmetros cinéticos (potencial máximo de produção de metano, taxa máxima de produção de metano e *fase lag*) foram analisados por meio do modelo sigmoidal de Gompertz modificado. Além disso, rendimento, taxas de produção volumétrica específica de metano, eficiência de remoção de biomassa (STV) e pH também foram analisados.

5.3. Métodos analíticos

5.3.1. Análises físico-químicas

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Controle Ambiental (LCA) e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), ambos localizados no Centro de Tecnologia da UFAL. Os parâmetros físico-químicos analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH) e série de sólidos (ST, STF, STV) (APHA; AWWA; WEF, 2012).

5.3.2. Análise de biometano por cromatografia gasosa

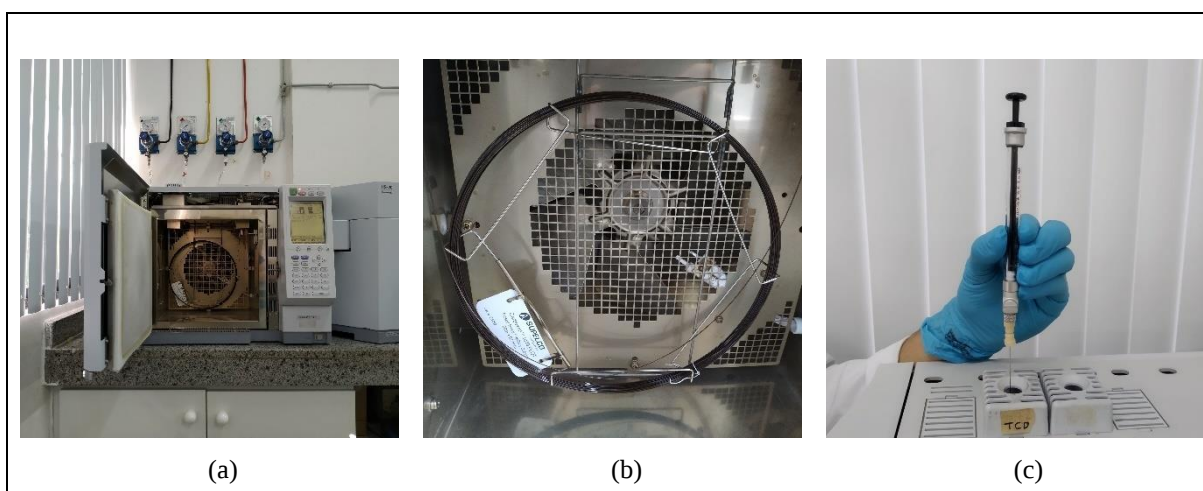
As curvas de produção acumulada de metano foram obtidas durante o experimento em batelada, sendo calculadas de acordo com a Equação 4.

$$V_{H,i} = V_{H,i-1} + C_{H,i}(V_{G,i} - V_{G,i-1}) + V_{H,0}(C_{H,i} - C_{H,i-1}) \quad (4)$$

Em que $V_{H,i}$ é o volume de metano acumulado no tempo atual; $V_{H,i-1}$ é o volume de metano acumulado no tempo anterior; $C_{H,i}$ é o volume de metano acumulado no *headspace* do recipiente no tempo atual; $C_{H,i-1}$ é o volume de metano acumulado no *headspace* do recipiente no tempo anterior; $V_{G,i}$ é o volume total de biogás no tempo atual; $V_{G,i-1}$ é o volume total de biogás no tempo anterior; e $V_{H,0}$ é o volume de metano acumulado no tempo inicial.

O metano foi detectado e quantificado, de acordo com a metodologia adaptada Adorno, Hirasawa e Varesche (2014), por intermédio de um cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010 (Figura 18a) equipado com um detector de condutividade térmica (TCD) e uma coluna Carboxen™ 1010 PLOT com capilar de sílica fundida (30,00m x 0,53mm x 0,00μm), tendo o Ar como gás de arraste (Figura 18b). As temperaturas do injetor, detector e coluna foram 200, 230 e 35°C, respectivamente. O tempo total de análise foi de 7,5 minutos, sendo o metano detectado em $3,8 \pm 0,1$ min, aplicando uma rampa de temperatura de 190°C por 3 min, e posteriormente, aumentando-se 15°C até atingir a temperatura de 250°C.

Figura 18 – Cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010 (a), coluna Carboxen™ 1010 PLOT e injeção da amostra gasosa com o auxílio de uma seringa GASTIGHT® (c).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para a análise, 1 mL do gás contido no *headspace* foi injetado manualmente no cromatógrafo gasoso com o auxílio de uma seringa GASTIGHT® com trava da marca HAMILTON® (Figura 18c). A calibração da cromatografia gasosa foi realizada usando 99,999% (v/v) de CH₄. As configurações do equipamento para a análise estão dispostas no Quadro 1 (ADORNO; HIRASAWA; VARESCHE, 2014).

Quadro 1 – Configurações para detecção de CH₄ por intermédio do cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010.

Configurações para detecção de CH₄ por intermédio do cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010	
a) SPL:	• Temperatura: 200°C; • Gás de arraste: Argônio (Ar); • Pressão: 51,5 kPa; • Fluxo total: 18,1 mL/min; • Fluxo coluna: 5,05 mL/min; • Velocidade linear: 46,6 cm/s; • Fluxo de purga: 3,0 mL/min; • Razão Split: 2,0
b) Coluna:	• Temperatura: 190°C; • Informações da coluna: CarboxenTM 1010 PLOT com capilar de sílica fundida; • Temperatura máxima: 250°C; • Comprimento: 30,0 m; • Diâmetro interno: 0,53 mm; • Espessura do filme: 0,00 µm; • Programa de temperatura do forno da coluna: 35°C (5').
c) TCD:	• Temperatura: 230°C; • Tempo total de análise: 7,5 min; • Corrente: 35 mA; • Polaridade: (-); • Gás de arraste: Argônio (Ar); • Fluxo de arraste: 3,0 mL/min.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3.1 Análise de modelo

A produção acumulada de metano foi ajustada pelo modelo de Gompertz modificado (Equação 5) (LAY; LEE; NOIKE, 1999) com o auxílio do Solver presente no Microsoft Excel® (v 2001, Microsoft, USA).

$$H = P \cdot \exp \left[-\exp \left\{ \frac{R_m}{P} \cdot (\lambda - t) \cdot e + 1 \right\} \right] \quad (5)$$

Em que H é a produção acumulada de metano (mL); P é potencial de produção de metano (mL); R_m é a taxa de produção de metano (mL/d); t é o tempo de incubação dos reatores (d); e é o número de Euler (2,71828); e λ é a *fase lag* (d).

Neste estudo, o modelo de Gompertz modificado foi aplicado para ajustar a produção acumulada de metano para obter P, R_m e λ . O rendimento de metano foi calculado dividindo a produção acumulada pela quantidade de sólidos totais voláteis aplicado (Equação 6).

$$HY = \frac{H}{STV_{apl}} \quad (6)$$

Em que HY (mL/g STV) é o rendimento de metano H é a produção acumulada de metano (mL); STV_{apl} é quantidade de sólidos voláteis totais aplicado (g/L).

O software *Statistica 7.0* foi utilizado para encontrar o modelo estatístico que descreve a variável resposta (rendimento) em função das variáveis independentes (concentração de biomassa e salinidade do meio), não considerando interação e considerando interação. O modelo linear é representado pela Equação 7 e o modelo quadrático é representado pela Equação 8.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 \quad (7)$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1^2 + b_4 \cdot x_2^2 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (8)$$

Em que $\hat{y}$ é a resposta, x_1 e x_2 são valores reais, b_0 é uma constante, b_1 e b_2 são coeficientes lineares, b_3 , b_4 e b_5 são coeficientes quadráticos.

Na Tabela 16, são apresentados os resultados da análise de variância (ANOVA) do modelo linear para a variável resposta.

Tabela 16 – ANOVA para o modelo linear para a variável resposta.

Fonte de Variação	SQ	Nº g.L	MQ
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = \frac{SQ_R}{p - 1}$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = \frac{SQ_r}{n - p}$
Falta de ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{fal} = \frac{SQ_{faj}}{m - p}$
Erro puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = \frac{SQ_{ep}}{n - m}$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	
% da variação explicada: SQ_R/SQ_T % máxima de variação explicável: $(SQ_T - SQ_{ep})/SQ_T$			

Fonte: Elaborado pelo autor – Adaptado de Barros, Scarminio e Bruns (2001)

Para analisar a significância estatística do modelo são aplicados os testes F. Os dois testes são usados para fazer previsões acerca do comportamento da resposta. No primeiro teste, o modelo é significativo se a razão entre a média quadrática de regressão (MQ_R) e a de resíduos (MQ_r) for superior ao teste F (Equação 9). Para o segundo teste, a razão entre a média quadrática da falta de ajuste (MQ_{faj}) e a de erro puro (MQ_{ep}) tem que ser inferior ao teste F para que o modelo seja significativo (Equação 10).

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} \gg F_{p-1, n-p} \quad (9)$$

$$\frac{MQ_{faj}}{MQ_{ep}} \ll F_{m-p, n-m} \quad (10)$$

Ambos os testes precisam ser verdadeiros para tornar o modelo adequado para previsões acerca do comportamento da variável resposta com as variáveis independentes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Geração de biometano a partir das macrófitas aquáticas

Na primeira etapa do estudo, foi avaliada a possibilidade de geração de biometano a partir das macrófitas aquáticas. Para isso, foi realizado um ensaio em reatores de 1.000 mL, com volume reacional igual a 500 mL, contendo 25% de inóculo e 75% de água destilada. A concentração de substrato utilizada foi de 5 g/100 mL e o meio reacional apresentava 0 g/L de salinidade. O estudo foi realizado em duplicata.

Neste estudo o modelo de Gompertz modificado (Equação 4) foi aplicado para ajustar os dados da produção acumulada de metano de cada reator, obtendo P, R_m e λ (Tabela 15). Os coeficientes de determinação (R^2) de todos os ajustes foram de $0,99195 \pm 0,0005$, indicando que o modelo aplicado descrever o progresso da produção acumulativa de metano nos testes em batelada deste estudo com sucesso. O potencial de produção de metano, rendimento e taxa foram de $6330,2 \pm 181,02$ mL, $297,07 \pm 18,87$ mL/g STV e $158,8 \pm 3,05$ mL/d respectivamente (Tabela 17). Após o período de incubação o pH dos reatores estavam na faixa de 6,89-7,01, mantendo-se dentro do pH ótimo para a produção de metano. Este fato se deve a utilização do bicarbonato de sódio antes da partida experimental que atuou como tampão estabilizando e mantendo o pH ótimo.

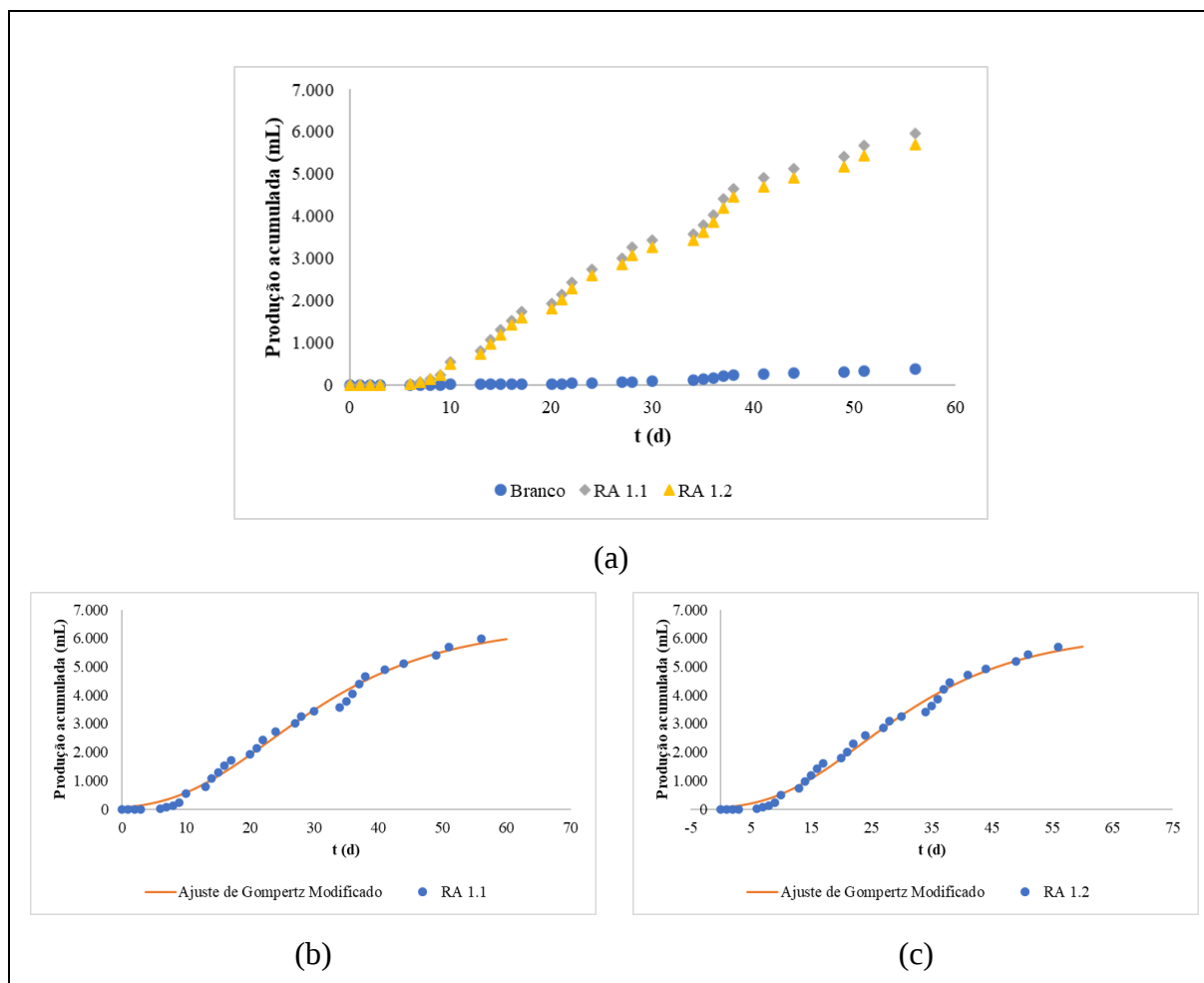
Tabela 17 – Parâmetros cinéticos para produção de metano calculado a partir do Modelo de Gompertz Modificado.

Reator	H (mL)	R^2	P (mL)	HY (mL/g STV)	R_m (mL/d)	λ (d)
RA 1.1	5.971,7	0,9916	6.458,2	310,42	161,8	8,3
RA 1.2	5.703,6	0,9923	6.202,2	283,73	155,7	8,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As curvas de produção de metano ajustadas, para cada um dos reatores, pelo modelo de Gompertz modificado estão disponíveis na Figura 19.

Figura 19 – (a) Produção acumulada de metano ao longo do experimento e (b) e (c) curvas de produção acumulada de CH₄ ajustadas pelo modelo de Gompertz modificado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O rendimento de metano, cerca de $297,07 \pm 18,87$ mL/g STV, foi similar aos trabalhos encontrados na literatura que fizeram uso apenas de plantas aquáticas como substrato do processo, apresentados na Tabela 6, no item 3.1.8. Isto é um indicativo que o processo inicial para validação do substrato como fonte de energia é válido.

Tabela 18 – Resultados obtidos após o término da primeira etapa experimental.

Reator	pH _{Final}	H (mL)	STV _{apli} (g/L)	HY (mL/g STV)
Branco	7,01	385,9	$6,34 \pm 0,77$	60,86
RA 1.1	6,89	5.971,7	$38,48 \pm 1,40$	310,42
RA 1.2	6,98	5.703,6	$40,21 \pm 3,09$	283,73

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

6.2. Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Na segunda etapa, o estudo das variáveis foi realizado mediante a técnica estatística de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) a fim de investigar as melhores condições de geração de biometano, como produto de valor agregado. Duas variáveis, concentração de substrato e salinidade do meio, foram estudadas totalizando 9 experimentos distintos, onde apenas o ponto central foi realizado em triplicata, totalizando 11 reações.

Inicialmente, o planejamento 2^2 com pontos centrais foi considerado a fim de determinar a influência da concentração de substrato (A) e a salinidade do meio (B) no rendimento de metano e analisar se o modelo linear seria aplicável. A matriz de planejamento foi dada pela Tabela 19.

Tabela 19 – Matriz de planejamento considerando um planejamento 2^2 com pontos centrais.

Reator	A	B	x_1	x_2	H (mL)	STV _{apli} (g/L)	HY (mL/g STV)
1	8	3	-1	-1	577,8	61,6	75,1
2	12	3	1	-1	638,5	94,4	54,1
3	8	17	-1	1	450,8	64,3	56,1
4	12	17	1	1	407,2	93,7	34,8
5	10	10	0	0	669,4	76,3	70,2
6	10	10	0	0	655,9	76,3	68,8
7	10	10	0	0	696,4	75,5	73,8

A (concentração de biomassa) e B (salinidade do meio).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os dados mostram o rendimento de metano para cada combinação de fatores, além do ponto central. O rendimento médio dos pontos fatoriais é igual a 55,0 e a média do ponto central é igual a 70,9. Sendo assim, o ponto central é superior à média dos pontos fatoriais, sugerindo uma possível curvatura.

O software *Statistica 7.0* foi utilizado para encontrar o modelo estatístico que descreve o rendimento de metano em função da concentração de biomassa e salinidade do meio, desconsiderando interação e considerando o intervalo de confiança de 95%. O modelo linear foi obtido a partir da Equação 7 para ajustar os dados experimentais do rendimento de metano.

$$HY\left(\frac{\text{mL}}{\text{g STV}}\right) = 61,84 - 10,575 \cdot A - 9,575 \cdot B \quad (10)$$

Em que HY é o rendimento de metano; A e B são os valores da concentração de biomassa e salinidade do meio, respectivamente.

Os resultados de p mostram que ambos os efeitos são significativos (Tabela 19). A partir da Figura 20 é possível verificar que as variáveis são significativas para o rendimento de metano conforme já observado através da Tabela 20.

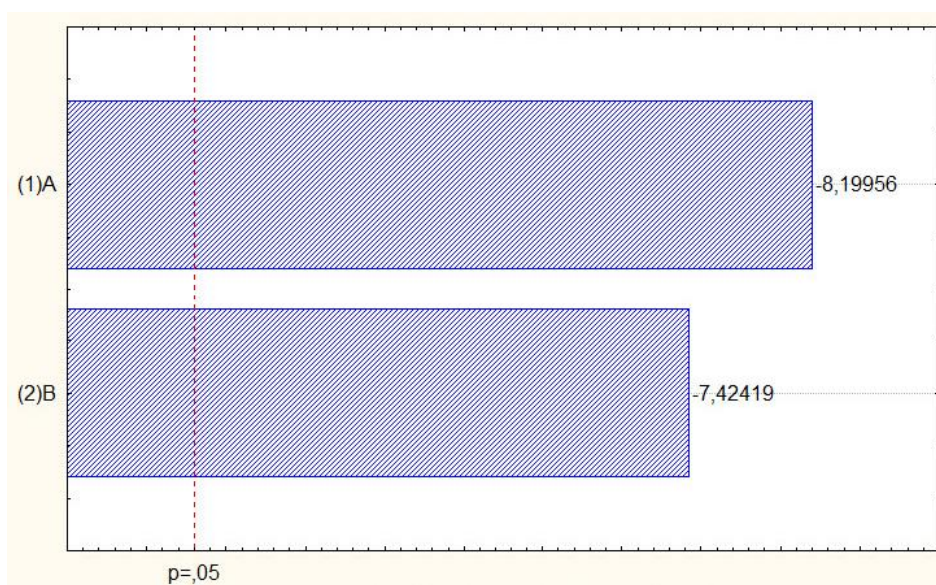
Tabela 20 – Coeficientes não codificados.

Termo	Efeito	t(2)	Coeficiente	p
Constante	61,8429	63,43354	61,8429	0,000248
A	-21,1500	-8,19956	-10,5750	0,014550
B	-19,1500	-7,42419	-9,5750	0,017663

A (concentração de substrato) e B (salinidade do meio).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 20 – Gráfico de Pareto dos efeitos A e B no rendimento de metano.

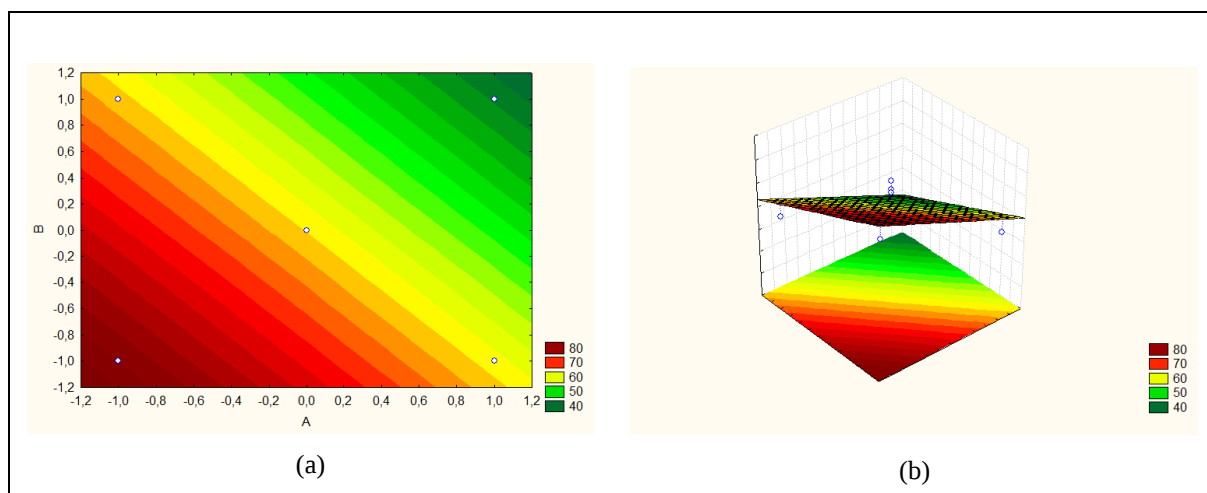


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Através da análise da superfície de resposta e do gráfico de contorno (Figura 21) é possível verificar que os maiores rendimentos de metano são obtidos em regiões com valores de concentração de biomassa e salinidade do meio mais baixos. O resultado pode ser explicado devido ao excesso de sais inibir a atividade microbiana, especialmente das arqueias

metanogênicas. Além disso, altas concentrações de biomassa afetam a taxa de solubilização da celulose em reatores anaeróbios, podendo provocar até uma ineficiência no processo (JENSEN, 2008; NURUL; MOLLAH; SIDDIQUE, 2022; YI et al., 2014; ZUPANČIČ et al., 2023).

Figura 21 – (a) Gráfico de contorno e (b) superfície de resposta para o rendimento de metano em função da concentração de substrato (A) e salinidade do meio (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para o reator com concentração de substrato igual a 8 g/100 mL de solução observou-se uma diminuição no rendimento de metano com o aumento da salinidade do meio (3 para 17 g/L), cerca de 25%. Para o reator com concentração de biomassa igual a 12 g/100 mL de solução também se observou uma diminuição no rendimento de metano com o aumento da salinidade do meio (3 para 17 g/L), cerca de 35%. A partir da análise dos efeitos observou-se que concentração de biomassa e salinidade do meio mais baixas melhoram o rendimento de metano.

Na Tabela 21, são apresentados os resultados da análise de variância (ANOVA) do modelo linear para a variável resposta (rendimento de metano).

Tabela 21 – ANOVA para o modelo linear para o rendimento de metano.

Fonte de Variação	SQ	Nº g.L	MQ
Regressão	814,05	2	407,02
Resíduos	447,17	4	111,79
Falta de ajuste	433,87	2	216,93
Erro puro	13,31	2	6,65
Total	1261,22	6	
% da variação explicada: 0,64544			

% máxima de variação explicável: 0,46817

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No primeiro teste, o modelo é significativo se a razão entre a média quadrática de regressão (MQ_R) e a de resíduos (MQ_r) for superior ao teste F (Equação 9).

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} \gg F_{2,4} \quad (12)$$

$$3,6409 \gg 6,9443 \text{ (falso)} \quad (13)$$

Para o segundo teste, a razão entre a média quadrática da falta de ajuste (MQ_{faj}) e a de erro puro (MQ_{ep}) tem que ser inferior ao teste F para que o modelo seja significativo (Equação 10).

$$\frac{MQ_{faj}}{MQ_{ep}} \ll F_{2,2} \quad (14)$$

$$32,62 \ll 19,00 \text{ (falso)} \quad (15)$$

Nota-se que o modelo linear não descreve bem os experimentos, já que não passa nos testes F. Além disso, a porcentagem de variação explicada é de 64,54%. A falta de ajuste pode ser justificada pela superfície não ser linear, e ter curvatura. Deve-se de propor então um novo modelo.

Uma verificação de curvatura foi realizada com o auxílio do software *Statistica 7.0* e os foram dispostos na Tabela 22.

Tabela 22 – Coeficientes não codificados.

Termo	Efeito	t(2)	Coeficiente	p
Constante	55,0250	42,66487	55,0250	0,000549
Curvatura	31,8167	8,07508	15,9083	0,014992
A	-21,1500	-8,19956	-10,5750	0,014550
B	-19,1500	-7,42419	-9,5750	0,017663

% da variação explicada: 0,98943

% máxima de variação explicável: 0,97886

A (concentração de biomassa) e B (salinidade do meio).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Nota-se que a curvatura é significativa, o que mostra que precisamos de termos quadráticos no modelo para modelar a curvatura na superfície de resposta.

Como o modelo linear não descreveu bem os experimentos, o modelo quadrático foi proposto (Equação 8). Entretanto, para que ele seja aplicado uma ampliação foi realizada usando a técnica estatística de DCCR. 4 novas linhas foram adicionadas à matriz de planejamento (Tabela 23).

Tabela 23 – Matriz de planejamento considerando um DCCR.

Reator	A	B	x ₁	x ₂	H (mL)	STV _{apli} (g/L)	HY (mL/g STV)
1	8	3	-1	-1	577,8	61,6	75,1
2	12	3	1	-1	638,5	94,4	54,1
3	8	17	-1	1	450,8	64,3	56,1
4	12	17	1	1	407,2	93,7	34,8
5	10	10	0	0	669,4	76,3	70,2
6	10	10	0	0	655,9	76,3	68,8
7	10	10	0	0	696,4	75,5	73,8
8	7	10	$-\sqrt{2}$	0	278,8	49,4	45,2
9	10	20	0	$\sqrt{2}$	147,6	41,0	19,5
10	13	10	$\sqrt{2}$	0	480,4	58,7	65,5
11	10	0	0	$-\sqrt{2}$	581,8	60,7	113,6

A (concentração de biomassa) e B (salinidade do meio).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As curvas de produção de metano ajustadas, para cada um dos reatores, pelo modelo de Gompertz modificado estão disponíveis no Apêndice A.

O software Statistica 7.0 foi utilizado para encontrar o modelo estatístico que descreve o rendimento de metano em função da concentração de substrato e salinidade do meio, considerando interação e considerando o intervalo de confiança de 95%. O modelo quadrático foi obtido a partir da Equação 8 para ajustar os dados experimentais do rendimento de metano.

$$HY\left(\frac{\text{mL}}{\text{g STV}}\right) = 70,93 - 1,70 \cdot A - 21,42 \cdot B - 9,28 \cdot A^2 - 3,67 \cdot B^2 - 0,08 \cdot A \cdot B \quad (16)$$

Em que HY é o rendimento de metano; A e B são os valores da concentração de substrato e salinidade do meio, respectivamente.

Os resultados de p mostram que ambos os efeitos são significativos (Tabela 23). A partir da Figura 22 é possível verificar que as variáveis são significativas para o rendimento de metano conforme já observado através da Tabela 24.

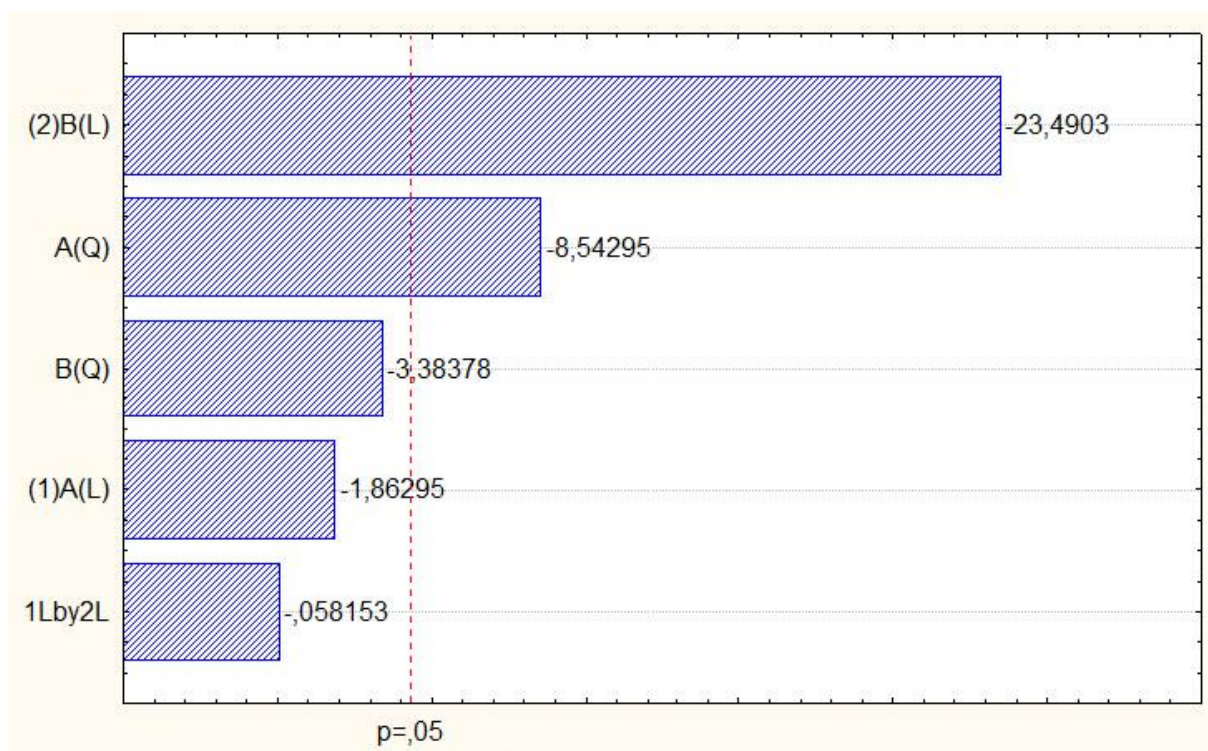
Tabela 24 – Coeficientes não codificados.

Termo	Efeito	t(2)	Coeficiente	p
Constante	70,9333	47,6312	70,9333	0,000440
A	-3,3979	-1,8630	-1,6989	0,203502
B	-42,8444	-23,4903	-21,4222	0,001807
A ²	-18,5458	-8,5430	-9,2729	0,013427
B ²	-7,3458	-3,3838	-3,6729	0,077340
AB	-0,1500	-0,0582	-0,0750	0,958914

A (concentração de biomassa) e B (salinidade do meio).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

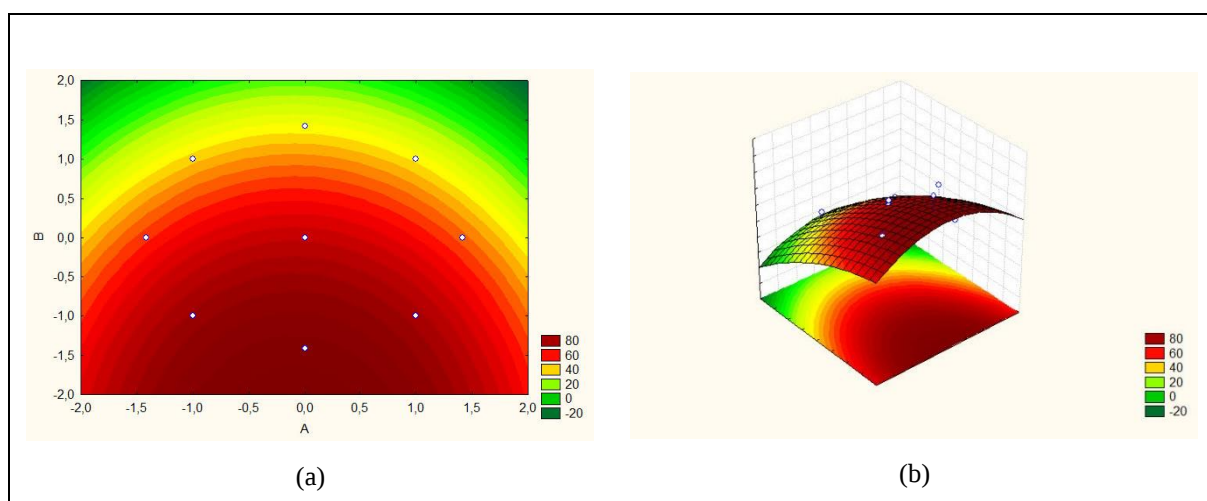
Figura 22 – Gráfico de Pareto dos efeitos A e B no rendimento de metano.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Através da análise da superfície de resposta e do gráfico de contorno (Figura 23) é possível verificar que os maiores rendimentos de metano são obtidos em regiões com valores de concentração de substrato e salinidade do meio mais baixos. O resultado pode ser explicado devido ao excesso de sais inibir a atividade microbiana, especialmente das arqueias metanogênicas. Além disso, altas concentrações de biomassa afetam a taxa de solubilização da celulose em reatores anaeróbios, podendo provocar até uma ineficiência no processo (JENSEN, 2008; NURUL; MOLLAH; SIDDIQUE, 2022; YI et al., 2014; ZUPANČIČ et al., 2023).

Figura 23 – (a) Gráfico de contorno e (b) superfície de resposta para o rendimento de metano em função da concentração de substrato (A) e salinidade do meio (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para o reator com concentração de biomassa igual a 8 g/100 mL de solução observou-se uma diminuição no rendimento de metano com o aumento da salinidade do meio (3 para 17 g/L), cerca de 25%. Para o reator com concentração de biomassa igual a 12 g/100 mL de solução também se observou uma diminuição no rendimento de metano com o aumento da salinidade do meio (3 para 17 g/L), cerca de 35%. A partir da análise dos efeitos observou-se que concentração de biomassa e salinidade do meio mais baixas melhoram o rendimento de metano.

Na Tabela 25, são apresentados os resultados da análise de variância (ANOVA) do modelo linear para a variável resposta (rendimento de metano).

Tabela 25 – ANOVA para o modelo linear para o rendimento de metano.

Fonte de Variação	SQ	Nº g.L	MQ
Regressão	4185,50	5	837,1
Resíduos	1836,64	5	367,33
Falta de ajuste	1823,33	3	607,778
Erro puro	13,307	2	6,653
Total	6022,14	10	
% da variação explicada: 0,69502			
% máxima de variação explicável: 0,39004			

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No primeiro teste, o modelo é significativo se a razão entre a média quadrática de regressão (MQ_R) e a de resíduos (MQ_r) for superior ao teste F (Equação 8).

$$\frac{MQ_R}{MQ_r} \gg F_{5,5} \quad (11)$$

$$2,2789 \gg 5,05 \text{ (falso)} \quad (12)$$

Para o segundo teste, a razão entre a média quadrática da falta de ajuste (MQ_{faj}) e a de erro puro (MQ_{ep}) tem que ser inferior ao teste F para que o modelo seja significativo (Equação 10).

$$\frac{MQ_{faj}}{MQ_{ep}} \ll F_{3,2} \quad (13)$$

$$91,36 \ll 19,16 \text{ (falso)} \quad (14)$$

Nota-se que o modelo quadrático também não descreve bem os experimentos, já que não passa nos testes F. Além disso, a porcentagem de variação explicada é de 69,50%. Apesar disso, a partir da análise dos efeitos e das representações gráficas, observa-se que concentração de biomassa e salinidade do meio mais baixas melhoram o rendimento de metano. Mesmo trabalhando com um nível de confiança mais baixo (85%) o modelo quadrático não consegue descrever bem os experimentos, pois não continua passando nos testes F.

A falta de ajuste pode estar atrelada as dificuldades da aplicação de planejamentos estatísticos em processos biológicos. Os sistemas biológicos são, por natureza, altamente complexos e não-lineares. As interações entre fatores muitas vezes não seguem padrões previsíveis. Essa complexidade pode tornar difícil a modelagem adequada do sistema. Pequenas

variações ambientais, diferenças entre lotes de reagentes ou mesmo flutuações naturais nos organismos vivos podem introduzir ruídos significativos nos dados experimentais. Essa variabilidade compromete a reprodutibilidade dos experimentos e dificulta a identificação de efeitos reais dos fatores estudados (CHENG; XIE; ZHENG, 2024; SHI; WANG; DING, 2025; WHITE et al., 2016; XU; PHOA; WONG, 2009).

Neste estudo o modelo de Gompertz modificado (Equação 4) foi aplicado para ajustar os dados da produção acumulada de metano de cada reator, obtendo P, R_m e λ (Tabela 15). Os coeficientes de determinação (R^2) de todos os ajustes foram entre 0,9942 e 0,9969, indicando que o modelo aplicado descrever o progresso da produção acumulativa de metano nos testes em batelada deste estudo com sucesso. O maior potencial de produção de metano, rendimento e taxa foram de 715,40 mL (reator 7), 113,6 mL/g STV (reator 11) e 46,64 mL/h (reator 2), respectivamente (Tabela 26). Após o período de incubação o pH dos reatores estavam na faixa de 7,41-7,56, mantendo-se dentro do pH ótimo para a produção de metano. Este fato se deve a utilização do bicarbonato de sódio antes da partida experimental que atuou como tampão estabilizando e mantendo o pH ótimo.

Tabela 26 – Parâmetros cinéticos para produção de metano calculado a partir do Modelo de Gompertz Modificado.

Reator	H (mL)	R^2	P (mL)	HY (mL/g STV)	R_m (mL/d)	λ (d)
1	577,76	0,9942	590,80	75,1	38,06	11,19
3	450,75	0,9960	473,83	56,1	28,06	12,44
2	638,48	0,9957	651,70	54,1	46,64	11,44
4	407,25	0,9946	455,58	34,8	22,65	12,27
8	278,75	0,9966	315,18	45,2	14,53	11,53
10	480,37	0,9969	512,85	65,5	27,48	11,85
11	581,80	0,9965	607,43	113,6	34,62	11,53
9	147,62	0,9944	200,63	19,5	5,85	10,73
5	669,44	0,9964	683,71	70,2	43,97	11,84
6	655,90	0,9937	608,27	68,8	43,74	11,71
7	696,35	0,9967	715,40	73,8	45,21	11,88

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As curvas de produção de metano ajustadas, para cada um dos reatores, pelo modelo de Gompertz modificado estão disponíveis no Apêndice A.

Os rendimentos de metano foram similares aos trabalhos encontrados na literatura que fizeram uso apenas de plantas aquáticas como substrato do processo, apresentados na Tabela 6, no item 3.1.8. Isto é um indicativo que o processo inicial para validação do substrato como fonte de energia é válido.

7. CONCLUSÃO

A revisão bibliométrica forneceu uma visão geral sobre os trabalhos acerca da digestão anaeróbia e produção de biogás a partir de macrófitas aquáticas. O Brasil ocupa o quarto lugar na lista de países que publicaram o maior número de artigos sobre a temática. Apesar disso, não foi encontrado nenhum trabalho da Universidade Federal de Alagoas indexado na plataforma Scopus. Ressalta a importância de se criar mecanismos para solucionar as problemáticas do Rio São Francisco que impactam economia local e ecossistema marinho da região.

A etapa inicial do estudo demonstrou a viabilidade das macrófitas aquáticas coletadas no Baixo São Francisco para a produção de metano por meio do processo de fermentação anaeróbia. Os rendimentos obtidos foram comparáveis aos relatados na literatura, em estudos que utilizaram plantas aquáticas sem pré-tratamento químico ou em co-digestão com outros substratos.

Por meio do planejamento 2^2 com pontos centrais, observou-se que o modelo linear não se mostrou representativo, por apresentar uma porcentagem de variação explicada de 64,54%. A falta de ajuste está relacionada a existência de uma curvatura na superfície de resposta, como foi comprovada através dos cálculos. O aumento da salinidade do meio, considerando qualquer concentração de biomassa constante, acarretou numa diminuição no rendimento de metano.

Para DCCR, a aplicação do modelo quadrático também não se mostrou representativa. O modelo quadrático apresentou uma porcentagem de variação explicada de 69,50%. Porém, observou-se que concentração de biomassa e salinidade do meio mais baixas melhoraram o rendimento de metano, similar ao planejamento 2^2 com pontos centrais.

A aplicação da metodologia de planejamento fatorial em processos biológicos enfrenta desafios que dificultam a obtenção de um bom ajuste estatísticos dos modelos. A complexidade e a imprevisibilidade dos sistemas biológicos são fatores que contribuem para um ruído experimental significativo, reduzindo a capacidade do modelo fatorial de capturar com precisão os efeitos dos fatores estudados.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Aumentar a escala de trabalho dos reatores com viés industrial;
- ✓ Utilizar diferentes configuração de reatores sob mesmas condições de operação (pH, concentração afluente, temperatura, TDH);
- ✓ Investigar a co-digestão com outros resíduos mais ricos em matéria orgânica;
- ✓ Realizar um estudo econômico a fim de predizer os impactos da implementação de um sistema de geração de metano a partir das macrófitas aquáticas para a comunidade local;
- ✓ Investigar a produção de compostos de elevado valor agregado.

REFERÊNCIAS

- ADELEYE, B. A.; ADETUNJI, A.; BAMGBOYE, I. Towards Deriving Renewable Energy from Aquatic Macrophytes Polluting Water Bodies in Niger Delta Region of Nigeria. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 5, n. 2, p. 387–391, 11 jan. 2013.
- ADORNO, M. A. T.; HIRASAWA, J. S.; VARESCHE, M. B. A. Development and Validation of Two Methods to Quantify Volatile Acids (C2-C6) by GC/FID: Headspace (Automatic and Manual) and Liquid-Liquid Extraction (LLE). **American Journal of Analytical Chemistry**, v. 05, n. 07, p. 406–414, 2014.
- ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1933–1940, 2008.
- ANSOLA, G.; FERNÁNDEZ, C.; DE LUIS, E. Removal of organic matter and nutrients from urban wastewater by using an experimental emergent aquatic macrophyte system. **Ecological Engineering**, v. 5, n. 1, p. 13–19, out. 1995.
- ANYANWU, I. N. et al. Aquatic macrophytes (*Spirogyra porticalis* and *Nymphaea* L.) as substrates for biofuel production: potentials and challenges. **Scientific African**, v. 18, p. e01412, nov. 2022.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington DC: American Public Health Association, 2012.
- AQUINO, S. F. DE; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 152–161, jun. 2005.
- BARROS, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e indústria**. 2. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2001.

BAUER, A. et al. Anaerobic digestion of mixed silage of waterweed biomass and wheat straw in a long-term semi-continuous biogas production process. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 4, 5 dez. 2018.

BHATIA, P. et al. Effect of steam explosion pre-treatment on methane generation from *Ludwigia grandiflora*. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105771, nov. 2020.

BOWDEN, W. B.; GLIME, J. M.; RIIS, T. Macrophytes and Bryophytes. Em: **Methods in Stream Ecology**. [s.l.] Elsevier, 2007. p. 381–406.

BOYD, C. E. Production, Mineral Accumulation and Pigment Concentrations in *Typha Latifolia* and *Scirpus Americanus*. **Ecology**, v. 51, n. 2, p. 285–290, mar. 1970.

BRAY, D. G. et al. The Cultivation of Water Hyacinth in India as a Feedstock for Anaerobic Digestion: Development of a Predictive Model for Scaling Integrated Systems. **Energies**, v. 15, n. 24, p. 9599, 17 dez. 2022.

BROWN, A. E. et al. An Assessment of Different Integration Strategies of Hydrothermal Carbonisation and Anaerobic Digestion of Water Hyacinth. **Energies**, v. 13, n. 22, p. 5983, 16 nov. 2020.

CBHFS. **Centro de Documentação**. Disponível em:

<<https://cbhsaofrancisco.org.br/documentacao/centro-de-documentacao/>>. Acesso em: 9 fev. 2025.

CBHSF. **A Bacia**. Disponível em: <<https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>>. Acesso em: 10 nov. 2024.

CECCHI, F.; PAVAN, P.; MATA-ALVAREZ, J. Anaerobic co-digestion of sewage sludge: Application to the macroalgae from the Venice lagoon. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 17, n. 1, p. 57–66, jul. 1996.

CHENG, F.; XIE, W.; ZHENG, H. **Digital Twin Calibration for Biological System-of-Systems: Cell Culture Manufacturing Process**. 2024 Winter Simulation Conference (WSC). **Anais...IEEE**, 15 dez. 2024.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic reactors**. 1. ed. London: IWA Publishing, 2007. v. 4

COHEN, M. F. et al. Wastewater polishing by a channelized macrophyte-dominated wetland and anaerobic digestion of the harvested phytomass. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 48, n. 3, p. 319–330, fev. 2013.

DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 26, n. 1, p. 13–28, jan. 2001.

DHOTE, S.; DIXIT, S. Water quality improvement through macrophytes—a review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 152, n. 1–4, p. 149–153, 9 maio 2009.

DUTRA, J. DA C. F. et al. Pyrolysis and anaerobic digestion of the *Egeria Densa* biomass in different pretreatment conditions for potential use as a substrate in the generation of bioproducts. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101772, abr. 2021.

FERNANDES, K. D. et al. Can we use Cd-contaminated macrophytes for biogas production? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 27, p. 27620–27630, 8 set. 2019.

FONSECA, P. **Coração de atleta: Renascendo na mesma vida: Uma jornada de ousadia, superação e conquistas**. 1. ed. São Paulo: Garoa Livros, 2023.

FRAGOSO, C. R.; MARQUES, D. DA M.; FERREIRA, T. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. 1. ed. [s.l.] Oficina de Textos, 2009.

FUJIWARA, M. et al. Seasonal Changes in the Chemical Composition and Anaerobic Digestibility of Harvested Submerged Macrophytes. **BioEnergy Research**, v. 13, n. 2, p. 683–692, 11 jun. 2020.

GALE, P. M.; REDDY, K. R.; GRAETZ, D. A. Mineralization of Sediment Organic Matter under Anoxic Conditions. **Journal of Environmental Quality**, v. 21, n. 3, p. 394–400, jul. 1992.

GALLEGOS, D. et al. Mixed silage of Elodea and wheat straw as a substrate for energy production in anaerobic digestion plants. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 7, 1 dez. 2018.

GREEN, D. M.; SMITH, S. B. ZOOPLANKTON, ZOOBENTHOS AND FISH POPULATIONS IN CANADARAGO LAKE DURING THE INITIAL STAGES OF NUTRIENT CONTROL. **Tech Pap NY State Dep Environ Conserv**, n. 48, 1976.

HABIG, C.; RYTHER, J. H. Methane production from the anaerobic digestion of some marine macrophytes. **Resources and Conservation**, v. 8, n. 3, p. 271–279, jan. 1983.

IWEH, N. S. et al. Novel wet-solid states serial anaerobic digestion process for enhancing methane recovery of aquatic plant biomass. **Science of The Total Environment**, v. 730, p. 138993, ago. 2020.

JENSEN, P. D. **Measurement of Biomass Concentrations in Anaerobic Reactors and the Effect on Cellulose Solubilisation Rates**. [s.l.] The University of Queensland, 1 fev. 2008.

KIST, D. L. et al. Macrophytes as a Digestion Substrate. Assessment of a Sonication Pretreatment. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 5, p. 1765–1775, 7 maio 2020.

KOYAMA, M. et al. Anaerobic digestion of submerged macrophytes: Chemical composition and anaerobic digestibility. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 304–309, ago. 2014.

KOYAMA, M. et al. Enhancing anaerobic digestibility of lignin-rich submerged macrophyte using thermochemical pre-treatment. **Biochemical Engineering Journal**, v. 99, p. 124–130, jul. 2015.

KOYAMA, M. et al. Inhibition of anaerobic digestion by dissolved lignin derived from alkaline pre-treatment of an aquatic macrophyte. **Chemical Engineering Journal**, v. 311, p. 55–62, mar. 2017a.

KOYAMA, M. et al. Effect of alkaline pretreatment on mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of a submerged macrophyte: Inhibition and recovery against dissolved lignin during semi-continuous operation. **Bioresource Technology**, v. 238, p. 666–674, ago. 2017b.

KOYAMA, M. et al. Anaerobic co-digestion of alkali-pretreated submerged macrophytes and acidified food waste for reduction of neutralizing agents. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 125, p. 208–213, nov. 2017c.

LAY, J.-J.; LEE, Y.-J.; NOIKE, T. Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. **Water Research**, v. 33, n. 11, p. 2579–2586, ago. 1999.

LINCOLN, E. P. et al. Aquatic system for fuel and feed production from livestock wastes. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 33, n. 3, p. 159–169, mar. 1986.

MALTAIS-LANDRY, G.; MARANGER, R.; BRISSON, J. Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 2, p. 221–229, fev. 2009.

MHATRE, A. et al. Effect of multiple product extractions on bio-methane potential of marine macrophytic green alga *Ulva lactuca*. **Renewable Energy**, v. 132, p. 742–751, mar. 2019.

MOELLER, L. et al. Crop Characteristics of Aquatic Macrophytes for Use as a Substrate in Anaerobic Digestion Plants—A Study from Germany. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3016, 2 nov. 2018.

MOUGIN, E. Creation of an Integrated System for Tertiary Processing of Spent Domestic Water and Use of By-products of Purification.; [MISE EN PLACE D'UNE FILIERE INTEGREE DE TRAITEMENT TERTIAIRE DES EAUX USEES DOMESTIQUES ET DE

VALORISATION DES SOUS-PRODUITS DE L'EPURATION.]. **Bulletin de la Direction des etudes et recherches. Serie A, Nucleaire, hydraulique, thermique**, n. 3–4, p. 27, 1983.

NAVARRO, A. R.; RUBIO, M. C.; MALDONADO, M. C. A combined process to treat lemon industry wastewater and produce biogas. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 14, n. 1, p. 41–45, 21 fev. 2012.

NURUL, M.; MOLLAH, H.; SIDDIQUE, I. **Effect of salinity on biogas generation from anaerobic digestion of aquaculture wastewater**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/360481394>>.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidade de produção de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006. v. 1

O'SULLIVAN, C. et al. Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). **Ecological Engineering**, v. 36, n. 10, p. 1459–1468, out. 2010.

PARKIN, G. F.; OWEN, W. F. Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. **Journal of Environmental Engineering**, v. 112, n. 5, p. 867–920, out. 1986.

PASTARE, L. et al. Sustainable Use Of Macro-Algae For Biogas Production In Latvian Conditions: A Preliminary Study Through An Integrated Mca And Lca Approach. **Environmental and Climate Technologies**, v. 13, n. 1, p. 44–56, 1 dez. 2014.

PASTARE, L.; ROMAGNOLI, F. Life Cycle Cost Analysis of Biogas Production from *Cerathophyllum demersum*, *Fucus vesiculosus* and *Ulva intestinalis* in Latvian Conditions. **Environmental and Climate Technologies**, v. 23, n. 2, p. 258–271, 1 nov. 2019.

PDRH SF1. **A BACIA**. Disponível em: <https://pdrhsf1.com.br/?page_id=4407>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PORTAL ALAGOAS EM DADOS. **Municípios banhados pelo rio São Francisco no estado de Alagoas**. Disponível em: <<https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/rio-sao->

francisco-em-alagoas/resource/1815482b-b4ed-47bd-9fb8-89c73d2e3a27>. Acesso em: 11 nov. 2024.

PORTAL ALAGOAS EM DADOS. **Rio São Francisco em Alagoas**. Disponível em: <<https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/rio-sao-francisco-em-alagoas/resource/f19f6469-c9d0-4257-b0f6-8799416d15ea>>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SALAMA, A. M. et al. Nickel Oxide Nanoparticles Application for Enhancing Biogas Production Using Certain Wastewater Bacteria and Aquatic Macrophytes Biomass. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 4, p. 2059–2070, 3 abr. 2021.

SAUZE, F. Growth of Water Hyacinths in Residual Water.; [CULTURES DE JACINTHES SUR EAUX RESIDUAIRES.]. **Bulletin de la Direction des etudes et recherches. Serie A, Nucleaire, hydraulique, thermique**, n. 3–4, p. 29 – 33, 1983.

SCULTHORPE, C. D. **The Biology of Aquatic Vascular Plants**. London: Arnold, 1967.

SHI, L.; WANG, J.; DING, P. Forward selection and post-selection inference in factorial designs. **The Annals of Statistics**, v. 53, n. 2, 1 abr. 2025.

STABENAU, N. et al. A potential phosphorous fertilizer for organic farming: recovery of phosphorous resources in the course of bioenergy production through anaerobic digestion of aquatic macrophytes. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 16, 1 dez. 2018.

TAHERUZZAMAN, Q.; KUSHARI, D. P. Evaluation of some common aquatic macrophytes cultivated in enriched water as possible source of protein and biogas. **Hydrobiological Bulletin**, v. 23, n. 2, p. 207–212, dez. 1989.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. v. 1

WHITE, A. et al. The Limitations of Model-Based Experimental Design and Parameter Estimation in Sloppy Systems. **PLOS Computational Biology**, v. 12, n. 12, p. e1005227, 6 dez. 2016.

XU, H.; PHOA, F. K. H.; WONG, W. K. Recent developments in nonregular fractional factorial designs. **Statistics Surveys**, v. 3, n. none, 1 jan. 2009.

YI, J. et al. Effect of Increasing Total Solids Contents on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic Conditions: Performance and Microbial Characteristics Analysis. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, p. e102548, 22 jul. 2014.

ZEHNSDORF, A. et al. Biomass potential analysis of aquatic biomass and challenges for its use as a nonconventional substrate in anaerobic digestion plants. **Engineering in Life Sciences**, v. 18, n. 7, p. 492–497, 13 jul. 2018.

ZUPANČIČ, G. D. et al. Salinity Inhibition in Thermophilic Anaerobic Digestion of Organic Waste. **Applied Sciences**, v. 13, n. 11, p. 6590, 29 maio 2023.

APÊNDICE A – Curvas de produção de metano ajustadas pelo Modelo de Gompertz Modificado.

Tabela 27 - Produção acumulada de CH₄ (mL) obtida experimentalmente, referente a primeira etapa do estudo.

t (h)	Produção acumulada de CH ₄ (mL)		
	Branco	RA 1.1	RA 1.2
0	0,0	0,0	0,0
24	0,5	0,5	0,8
48	1,2	1,4	1,7
72	2,0	4,7	4,7
144	3,6	22,6	24,3
168	4,5	61,7	61,5
192	4,7	130,1	129,7
216	5,7	232,7	222,0
240	8,8	542,2	485,4
312	9,0	800,6	727,6
336	12,4	1.074,5	983,2
360	15,4	1.302,9	1.195,8
384	17,4	1.528,6	1.415,4
408	20,5	1.726,9	1.603,3
480	24,5	1.920,1	1.798,0
504	29,0	2.139,1	2.013,4
528	35,2	2.430,5	2.296,9
576	44,4	2.733,4	2.587,3
648	59,3	3.011,3	2.855,7
672	78,3	3.252,7	3.083,4
720	96,9	3.434,2	3.265,6
816	109,1	3.581,7	3.422,3
840	131,3	3.778,8	3.612,5
864	156,3	4.036,6	3.863,4
888	200,2	4.403,8	4.202,3
912	236,5	4.650,3	4.453,8
984	259,3	4.903,4	4.700,2
1056	285,1	5.120,8	4.914,5
1176	312,7	5.404,8	5.176,6
1224	340,5	5.681,1	5.435,1
1344	385,9	5.971,7	5.703,6

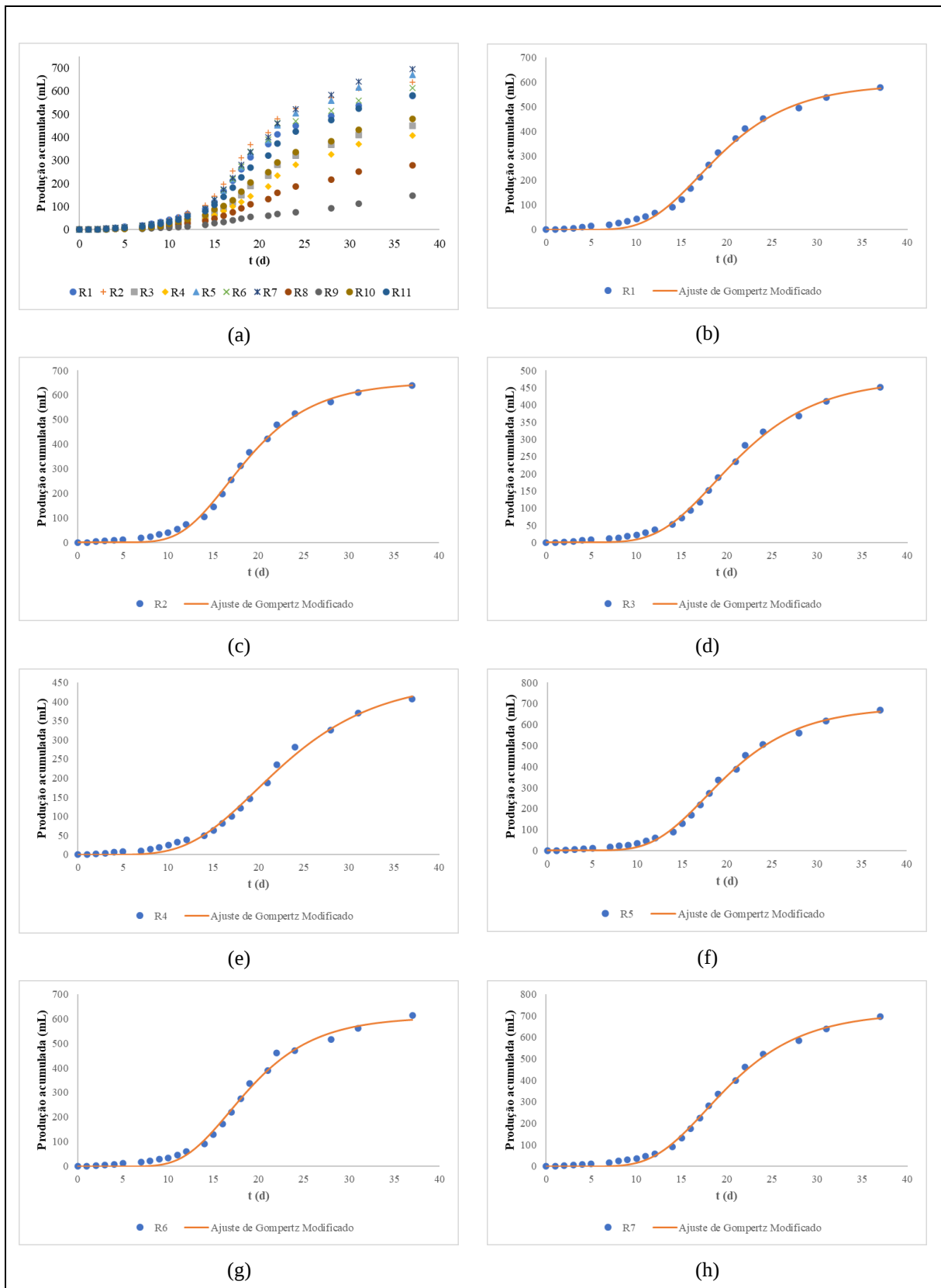
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 28 – Produção acumulada de CH₄ (mL) obtida experimentalmente, referente a segunda etapa do estudo.

t	Produção acumulada de CH₄ (mL)										
(d)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,63	0,69	0,11	0,42	0,47	0,53	0,62	0,22	0,26	0,32	0,53
2	2,43	3,41	1,65	2,07	2,60	2,84	2,89	1,48	0,84	0,99	1,37
3	6,28	5,93	3,21	4,01	4,91	4,99	5,19	2,68	1,64	1,92	2,91
4	9,74	9,06	5,82	5,83	7,74	7,85	8,29	4,22	2,48	3,10	5,80
5	14,46	12,28	8,16	7,53	11,24	11,37	12,02	5,82	3,26	4,50	8,89
7	19,09	18,44	11,12	9,79	16,26	17,13	18,19	8,31	4,90	7,31	12,97
8	26,26	23,79	13,78	14,20	21,41	22,20	24,09	10,48	6,13	10,46	18,44
9	34,24	31,88	17,90	19,08	26,85	27,94	29,81	13,49	7,59	16,64	25,37
10	42,50	40,50	22,47	25,38	33,01	33,63	35,29	17,32	9,12	25,69	34,15
11	52,55	53,64	28,46	32,08	44,54	44,57	46,55	22,36	11,02	35,65	44,57
12	67,13	72,95	36,59	38,46	58,62	59,25	58,26	29,62	14,09	45,71	57,91
14	90,49	104,28	52,73	49,08	89,83	90,81	89,67	37,60	21,38	64,04	79,36
15	121,15	144,02	71,23	63,98	128,21	129,97	130,34	49,18	28,35	87,40	108,46
16	168,33	197,53	92,97	81,31	169,08	171,44	174,35	59,83	33,26	102,94	143,11
17	211,95	254,83	117,25	100,00	219,15	220,11	224,66	75,20	41,17	127,41	181,89
18	262,46	311,49	150,56	121,34	272,52	274,05	280,92	92,17	48,48	163,65	225,78
19	312,38	367,01	188,99	145,41	336,35	337,26	336,41	110,70	55,07	205,66	269,51
21	369,92	421,35	234,51	187,88	386,80	390,06	399,17	133,42	61,19	249,80	320,31
22	411,77	478,71	282,35	234,79	452,37	461,76	460,74	159,63	68,44	291,74	372,58
24	450,79	524,48	321,60	280,60	504,08	469,88	522,00	187,12	76,52	335,17	425,22
28	493,27	571,63	368,03	325,83	559,06	515,17	584,56	217,10	92,80	381,86	473,60
31	536,13	610,04	410,87	369,42	616,98	559,70	640,14	252,46	112,61	431,54	525,05
37	577,76	638,48	450,75	407,25	669,44	613,84	696,35	278,75	147,62	480,37	581,80

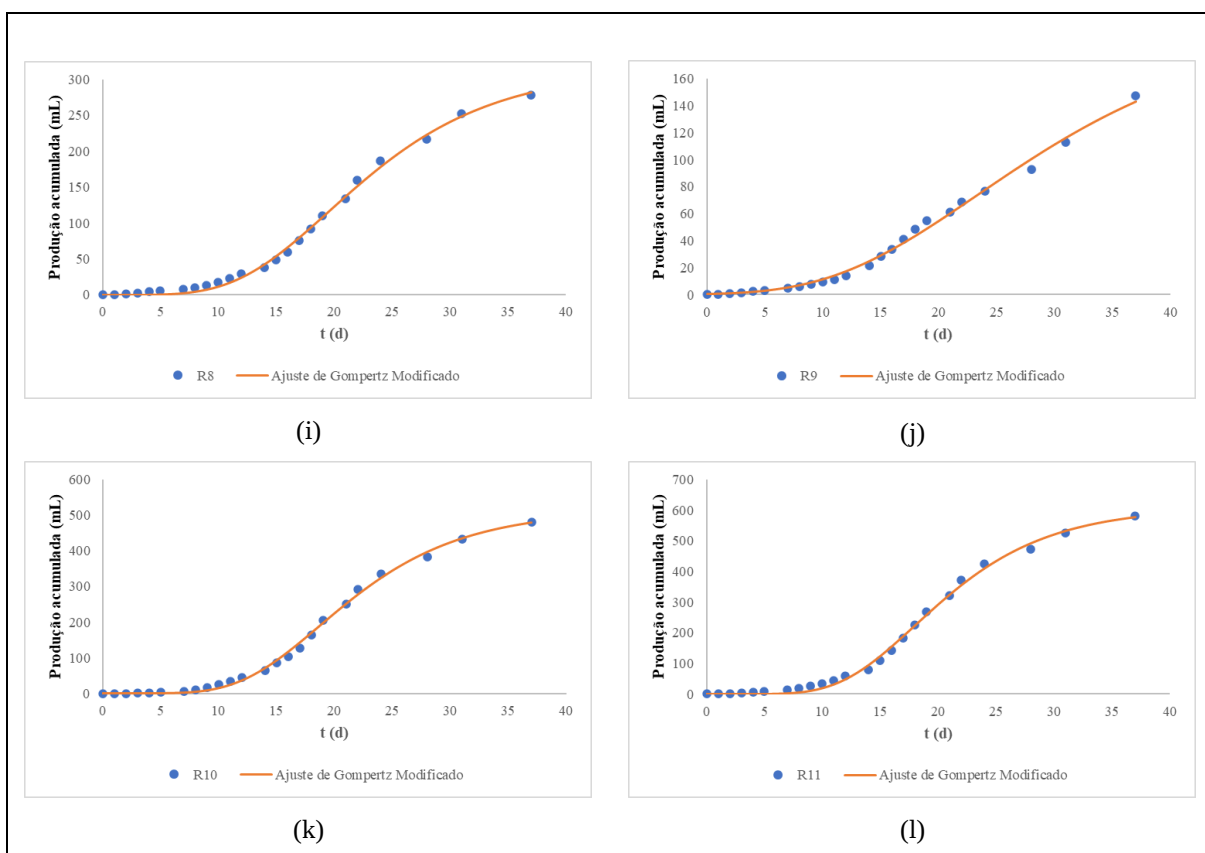
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 24 – (a) Produção acumulada de metano ao longo do experimento e (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k) e (l) curvas de produção acumulada de CH₄ ajustadas pelo modelo de Gompertz modificado (continua).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 25 – (a) Produção acumulada de metano ao longo do experimento e (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j), (k) e (l) curvas de produção acumulada de CH₄ ajustadas pelo modelo de Gompertz modificado (continuação).



Fonte: Elaborado pelo autor 2025