

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CAMPUS CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA – PGEAGRI

EDILENE DA SILVA PEREIRA

ABÓBORA COMO CULTURA ENERGÉTICA EM CODIGESTÃO ANAERÓBIA
COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA: ANÁLISE DE VIABILIDADE
TÉCNICA E FINANCEIRA

Cascavel – PR

2024

EDILENE DA SILVA PEREIRA

**ABÓBORA COMO CULTURA ENERGÉTICA EM CODIGESTÃO ANAERÓBIA
COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA: ANÁLISE DE VIABILIDADE
TÉCNICA E FINANCEIRA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) – *campus* Cascavel, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior.

Cascavel – PR

2024

BIOGRAFIA

Edilene da Silva Pereira, nascida em 06 de outubro de 1985, natural de Ji-Paraná, Rondônia, possui graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, pela Universidade Federal de Rondônia – UNIR, *campus* Ji-Paraná, concluída em 2012. Em 2019, concluiu o Mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Rondônia – UNIR, *campus* Rolim de Moura, Rondônia, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). É Docente do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO. Em 2024, obteve o título de Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *campus* Cascavel, Paraná, vinculado à área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, com atuação na linha de pesquisa de Saneamento Ambiental.

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

da Silva Pereira, Edilene

Abóbora como cultura energética em codigestão anaeróbia com água residuária da suinocultura: análise de viabilidade técnica e financeira / Edilene da Silva Pereira; orientadora Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa; coorientador Jorge de Lucas Júnior. -- Cascavel, 2024.

116 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2024.

1. Cucurbita moschata Duch.. 2. Cucurbita máxima Duch.. 3. Análise de viabilidade financeira. 4. Biofertilizante. I. Sarolli Silva de Mendonça Costa, Mônica, orient. II. de Lucas Júnior, Jorge, coorient. III. Título.

Dedico este trabalho a Deus, que me sustentou até aqui com força, coragem, saúde e resiliência. À minha família, que me apoiou desde o início em mais um desafio, me dando forças para realizar esta pós-graduação. Em especial, agradeço ao meu marido, Nairo, e à minha mãe, Maria Lindraci, que se dispuseram a me acompanhar em grande parte desta jornada, assim como meus filhos, Carolina e Cairo, e minha irmã Marcilane, que, com afeto e amor, trouxeram alegria aos meus dias comuns e excepcionais e esperança nos dias difíceis. Vocês são os maiores e os melhores presentes que eu poderia ter nesta vida, meu porto seguro e minha inspiração. Este trabalho é dedicado a vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Professora Dra. Mônica Sarolli, por acreditar em mim e me oportunizar a experiência do Doutorado, também agradeço pelos ensinamentos, pelas orientações, pelo exemplo e pelo direcionamento sempre.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Jorge de Lucas Junior, pelas orientações, pelos ensinamentos e pelas colaborações para com esta pesquisa.

Ao meu marido, Nairo, que se dispôs a encarar o desafio de uma pós-graduação em outra região do país, também por acompanhar nas medições noturnas de biogás e aos finais de semana, fazendo com que, de tanto vivenciar a fase experimental, em determinado momento, conseguia estimar as produções de biogás (com margem de erro). Muito obrigada, meu amor, pelo companheirismo.

À minha mãe, Maria Lindraci, que me acompanhou de Rondônia ao Paraná para cuidar dos meus filhos – sem saber ela que meu coração era cuidado por sua presença e sua dedicação à minha família. Agradeço, também, pela comidinha caseira, pela preocupação de quando me estendia no laboratório além do horário combinado, por cuidar dos meus filhos durante minhas idas à Cascavel e durante a dedicação à escrita e por, simplesmente, ser minha mãe. Sou imensamente grata à senhora.

Agradeço aos amigos do PGEAGRI, que foram verdadeiros anjos nessa caminhada, tanto no laboratório como para além dele: nas análises, nas conversas sobre técnicas e sobre a vida e sou grata também pelos nossos cafés. O meu muito obrigada a Ritieli, Bruna, Jéssica, Eduardo e Éllen.

Aos professores, Jackeline Gotardo, Simone Damasceno, Silvia Coelho, Divair Christ e Stela Montoro, assim como aos técnicos, Edison e Euro, pelas inúmeras contribuições.

Ao Jackson do CEASA, à Professora Ellen e à Thais da UNIOESTE – pelo fornecimento das abóboras utilizadas neste estudo.

À Luana, à Marianna, à Isadora e ao Felipe, que tanto contribuíram metodologias e em diversos momentos de dúvidas.

Pelas explicações sobre contabilidade e cooperativismo e a dedicação, agradeço à minha prima, Priscila de Souza Pereira, e ao Professor Tanã Rossi Lopes Bassegio.

À Thais e à Éllen, pela amizade, hospedagem e “roles”. Tenho muito carinho por vocês!

Ao Sr. Caetano e à Dona Bia, pela amizade e pelo acolhimento. A amizade de vocês durante minha estadia em Cascavel aqueceu meu coração!

A todos que mobilizaram esforços para tornar possível o desenvolvimento desta pesquisa e que, diretamente, fizeram parte do meu desenvolvimento pessoal e profissional, saibam que levarei vocês em meu coração por toda vida. Muito obrigada!

Há quem diga que todas as noites são de sonhos.

Mas há também quem garanta que nem todas, só as de verão. No fundo, isto não tem muita importância.

O que interessa mesmo não é a noite em si, são os sonhos. Sonhos que o homem sonha sempre, em todos os lugares, em todas as épocas do ano, dormindo ou acordado.

(William Shakespeare)

EDILENE DA SILVA PEREIRA

ABÓBORA COMO CULTURA ENERGÉTICA EM CODIGESTÃO ANAERÓBIA COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA: ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Saneamento Ambiental, APROVADA pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MONICA SAROLLI SILVA DE MENDONÇA COSTA**
Data: 12/09/2024 18:09:45-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Orientadora - Monica Sarolli Silva de Mendonça Costa

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 **JACKELINE TATIANE GOTARDO**
Data: 18/09/2024 08:36:53-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 **SIMONE DAMASCENO GOMES**
Data: 26/09/2024 18:38:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

JOHANE LARISSALENE VIANECI

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE MARTINS DAMASCENO**
Data: 04/09/2024 08:42:36-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

reuppe martins damasceno

Universidade Estadual do Maricá (UEM)

Documento assinado digitalmente
 **SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA**
Data: 26/09/2024 09:09:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Samuel Nelson Melegari de Souza

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 09 de agosto de 2024.

RESUMO

PEREIRA, Edilene da Silva. **Abóbora como cultura energética em codigestão anaeróbia com água residuária da suinocultura: análise de viabilidade técnica e financeira.** Orientadora: Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa; Coorientador: Jorge de Lucas Junior. 2024. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná, 2024.

O uso de Culturas Energéticas (CE) em Codigestão Anaeróbia (CoDA) com resíduos orgânicos, provenientes de sistemas de produção de animais confinados, proporciona maior potencial energético pela geração do biogás/metano e de um biofertilizante mais rico em nutrientes, atendendo as premissas da economia circular. Assim, esta pesquisa objetivou comparar os tratamentos de Monodigestão Anaeróbia (MonoDA) da ARS (T_0), CoDA da ARS e abóbora paulista seca crua (T_1), CoDA da ARS e abóbora paulista seca cozida (T_2), CoDA da ARS e abóbora moranga crua (T_3), e CoDA da ARS e abóbora moranga cozida (T_4). Para isso, foram conduzidos ensaios de Potencial de Produção de Metano (PPM), de acordo com a Norma Alemã VDI-4630 e em biodigestores de bancada com alimentação semicontínua, a que foram monitoradas as produções específicas de biogás e metano e a série de sólidos. Nos ensaios de PPM, realizou-se a análise cinética por meio dos modelos Gompertz Modificado, Cone, Primeira Ordem Modificado, Logístico e Logístico modificado e, no ensaio com alimentação semicontínua, foram determinados os parâmetros de pH, alcalinidade total (AT), acidez volátil (AV), qualidade agrônômica do biofertilizante e índice de germinação (IG). Os resultados obtidos definiram cenários em escala real para cooperativas agroindustriais, com a avaliação da viabilidade financeira. Os resultados das produções específicas de biogás e de metano do T_3 , dos ensaios de PPM, foram estatisticamente maiores aos demais tratamentos. Pela análise cinética, o modelo de Cone apresentou melhor ajuste das métricas e, devido ao incremento de biogás no T_3 , suas produções específicas foram maiores. Ratificou-se tais resultados do ensaio com alimentação semicontínua, que apresentou maior rendimento de biogás ($1025,9\text{L. kgSV}^{-1}$) e metano ($1025,9\text{L. kgSV}^{-1}$), além de incremento da produção específica em 22,2% e 26,8%, respectivamente, no T_3 em relação ao T_0 . O T_3 foi responsável também pela maior concentração de ácidos graxos voláteis (AGVs) – $1.516,8\text{mg.L}^{-1}$ AV – e melhor relação AV/AT – 0,3. As concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio aumentaram no biofertilizante em todos os tratamentos, revelando a eficiência das conversões, sugerindo o biofertilizante para a fertirrigação em lavoura como uma alternativa interessante do ponto de vista de valoração agrônômica e reciclagem nutricional. Com Valor Presente Líquido de R\$ 1.717,82, Taxa Interna de Retorno 30,5%, Índice de Lucratividade 1,98 e Payback descontado de 3,68, o T_3 foi o único cenário que apresentou viabilidade financeira, superando riscos de investimento em tempo, com liquidez e superávit.

Palavras-chave: *Cucurbita moschata* Duch.; *Cucurbita máxima* Duch.; Análise de viabilidade financeira; Biofertilizante.

ABSTRACT

Pereira, Edilene da Silva. **Pumpkin as an energy crop in anaerobic co-digestion with swine wastewater: technical and financial feasibility analysis**. Advisor: Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa; Co-Advisor: Jorge de Lucas Junior. 2024. 116 p. Thesis (Doctor Degree Agricultural Engineering) – Western Paraná State University– Paraná, 2024.

The use of Energy Crops (EC) in Anaerobic Codigestion (CoDA) with organic waste from confined animal production systems provides greater energy potential through the generation of biogas/methane and a biofertilizer richer in nutrients, meeting the premises of the circular economy. The aim of this study was to compare the following treatments: monodigestion of ARS (T0), co-digestion of ARS and raw dried squash (T1), co-digestion of ARS and cooked dried squash (T2), co-digestion of ARS and raw strawberry squash (T3), and co-digestion of ARS and cooked strawberry squash (T4). To this end, Methane Production Potential (MPP) tests were carried out in accordance with the German Standard VDI-4630 and in bench biodigesters with semi-continuous feeding, which monitored the specific production of biogas and methane and the series of solids. In the PPM trials, kinetic analysis was carried out using the Modified Gompertz, Cone, Modified First Order, Logistic and Modified Logistic models and, in the trial with semi-continuous feeding, the parameters of pH, total alkalinity (TA), volatile acidity (VA), agronomic quality of the biofertilizer and germination index (GI) were determined. The results obtained defined full-scale scenarios for agro-industrial cooperatives, with an assessment of financial viability. The results of the specific biogas and methane production of T3, from the PPM trials, were statistically higher than the other treatments. From the kinetic analysis, the Cone model showed a better fit of the metrics and, due to the increase in biogas in T3, its specific yields were higher. These results were confirmed by the test with semi-continuous feeding, which showed a higher yield of biogas (1025.9L.kgSV⁻¹) and methane (1025.9L.kgSV⁻¹), as well as an increase in specific production of 22.2% and 26.8%, respectively, in T3 compared to T0. T3 was also responsible for the highest concentration of volatile fatty acids (VFAs) - 1,516.8mg.L⁻¹ VA - and the best VA/VA ratio - 0.3. The concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium increased in the biofertilizer in all treatments, revealing the efficiency of the conversions, suggesting biofertilizer for fertigation in crops as an interesting alternative from the point of view of agronomic valuation and nutritional recycling. With a Net Present Value of R\$1,717.82, an Internal Rate of Return of 30.5%, a Profitability Index of 1.98 and a discounted Payback of 3.68, T3 was the only scenario that showed financial viability, overcoming investment risks in time, with liquidity and a surplus.

Keywords: *Cucurbita moschata* Duch.; *Cucurbita maxima* Duch.; Financial Feasibility Analysis; Biofertilizer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Número de estabelecimentos, produção em toneladas, área em hectares e produtividade em t.ha ⁻¹ das culturas de abobrinha.....	31
Tabela 2 Produção em toneladas, área em hectares e produtividade em t.ha ⁻¹ das culturas de abóbora, moranga e jerimum nos principais países produtores no mundo, em 2019.	34
Tabela 3 Dimensões médias (n = 6) das variedades de Abóboras Paulista Secas (APs) e Moranga, utilizadas no experimento.....	40
Tabela 4 Determinação de sólidos, matéria natural e volume das ARS e CE para o ensaio de PPM, para carga de abastecimento orgânico equivalente a 4,8% de ST.	42
Tabela 5 Configurações experimentais do ensaio de PPM.....	43
Tabela 6 Quantidade de matéria natural para composição das cargas de abastecimento de 2000 mL.d ⁻¹ , de 1,5% a 5,0% de ST, e COV para carga de 5% de SV.	48
Tabela 7 Caracterização físico-química das ARS, cargas de abastecimento e inóculo utilizados nos tratamentos, sob alimentação semicontínua.	49
Tabela 8 Metodologia de análises dos parâmetros de monitoramento e controle.....	51
Tabela 9 Estimativas de volume dos biodigestores para a análise de viabilidade financeira, contendo como ST 0,8% no T ₀ e 5% nos T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄ e TRH 30 dias..	56
Tabela 10 Estimativa de rendimento do biogás e valoração em energia elétrica.....	58
Tabela 11 Estimativa da quantidade dos macronutrientes NPK no biofertilizante gerado na cooperativa.....	60
Tabela 12 Receitas estimadas ao NPK presentes nos biofertilizantes, pela equivalência com os fertilizantes comerciais Sulfato de Amônio, Supersimples e Cloreto de potássio.	62
Tabela 13 Custos de produção das variedades de abóboras.	63
Tabela 14 Levantamento dos custos para a cocção das abóboras nos cenários T ₂ e T ₄	64
Tabela 15 Custos referentes aos investimentos à implantação dos biodigestores e conjunto motogerador.	65
Tabela 16 Estimativa de custos com manutenções e retíficas do motogerador e sistema de purificação do biogás, considerando o tempo necessário de 10.000 e	

30.000 horas, respectivamente, com custo de R\$ 0,14 kWh ⁻¹ (manutenção) e R\$ 0,01 kWh ⁻¹ (retífica).....	66
Tabela 17 Produção de biogás e metano da MonoDA (T ₀) e CoDA (T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄)..	70
Tabela 18 Parâmetros e métricas dos diferentes modelos cinéticos usados no ensaio de PPM.	76
Tabela 19 Produção de biogás e metano no ensaio semicontínuo.	81
Tabela 20 Eficiência de remoção (%) de material orgânico.	83
Tabela 21 Açúcares específicos presentes na carga de abastecimento dos biodigestores.....	85
Tabela 22 Valores de pH, alcalinidade, acidez volátil, relação AV/AT do ensaio semicontínuo.....	86
Tabela 23 Concentrações dos ácidos orgânicos acético, propiônico, láctico, butírico e fórmico na carga de abastecimento na entrada (E) e no biofertilizante na saída (S).	88
Tabela 24 Concentração de macronutrientes primários e secundários e micronutrientes nos biofertilizantes de MonoDA de ARS (T ₀) e CoDA de ARS com abóboras paulista (T ₁ e T ₂) e moranga (T ₃ e T ₄).	92
Tabela 25 Valores médios das variáveis Índice de Germinação (IG), pH, condutividade elétrica (CE), acidez volátil (AV) e sódio (Na).	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Variedades de abóboras: a) Cucurbita moschata (abóbora paulista seca) e b) Cucurbita maxima (abóbora moranga).....	38
Figura 2 Caracterização das abóboras a) paulista seca e b) moranga, quanto as dimensões de perímetro, espessura da casca e polpa, pesos da polpa, semente, casca e total.	39
Figura 3 Biofertilizante utilizado como inóculo nos reatores.....	40
Figura 4 Frascos âmbar a serem utilizados no experimento.....	41
Figura 5 Sistema de aferição de medição de biogás: seringa de vidro (A) e manômetro digital (B).	43
Figura 6 Desenho esquemático do corte transversal do reator modelo semicontínuo.	47
Figura 7. Sistema de aferição de biogás no ensaio semicontínuo: gasômetros com réguas graduadas (A) e pressão via manômetro digital e tubo em “U” (B).	50
Figura 8 Placa de Petri com as sementes de Lepidium sativum e extrato, antes (A) e depois de 72 horas de incubação (B), para o teste de fitotoxicidade.	53
Figura 9 Produção específica de biogás (a) e metano (b), por mL.g SV ⁻¹ , no decorrer dos 47 dias de experimento.	71
Figura 10 Produção específica de biogás e metano (mL.g SV ⁻¹) no decorrer de 47 dias, referente o experimento e modelos de Gompertz modificado, Cone, Primeira Ordem modificado, Logístico e Logístico modificado, para os tratamentos T ₀ , T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄	74
Figura 11 a) Concentração de AGVs na carga de abastecimento do reator e b) percentual correspondente aos AGVs, c) acidez volátil no biofertilizante e d) ácido acético no biofertilizante.....	90

LISTA DE SÍGLAS E ABREVIações

% diferença P – Diferença da produção acumulada de biogás, em percentual absoluto;

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal;

ACo – Abóbora Paulista Seca e Cozida;

ACr – Abóbora Paulista Seca Triturada e Crua;

AGV – Ácidos Graxos Voláteis;

Al³⁺ – Íons de alumínio;

AP – Alcalinidade parcial;

APA – Área para produção de abóboras;

ARS – Água Residuária da Suinocultura;

ATP – Adenosina trifosfática;

BOD – Câmara de demanda bioquímica de oxigênio;

C:N – Carbono para Nitrogênio;

Ca – Cálcio;

CBE – Conversão de biogás a energia elétrica;

CC – Ciclo Completo;

CdE – Condutividade elétrica;

CE – Culturas Energéticas;

Cfa – Clima Subtropical Mesotérmico

CH₃COOH – Ácido acético;

CH₄ – Metano;

CNTP – Condições normais de temperatura e pressão;

CO₂ – Dióxido de Carbono;

CO₃²⁻ – Íons de carbonato;

CoDA – Codigestão Anaeróbia;

COT – Carbono Orgânico Total;

COV – Carga orgânica volumétrica;

Cu – Cobre;

DA – Digestão Anaeróbia;

EC – Economia Circular;

EPIs – Equipamentos de proteção individual;

FCD – Fluxo de caixa descontado;

FCL – Fluxo de caixa livre;

Fe – Ferro;

GEEs – Gases de efeito estufa;

H⁺ – Íons de hidrogênio;

Ha – Hectares;

HCO₃⁻ – Íons de bicarbonato;

IG - Índice de germinação;

IL – Índice de lucratividade;

K – Potássio;

KCl - Cloreto de potássio;

MCo – Abóbora moranga triturada e cozida;

MCr – Abóbora moranga triturada e crua;

Mg – Magnésio;

Mmca – Milímetros de coluna d'água;

Mn – Manganês;

MN – Matéria natural;

MO – Matéria orgânica;

MonoDA – Monodigestão Anaeróbia;

MS – Matéria seca;

N – Nitrogênio;

Na – Sódio;

N-amon – Nitrogênio amoniacal.

NH₃⁺ – Amônia;

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl;

OD – Oxigênio Dissolvido;

OH⁻ – Íons de hidróxido;

P – Fósforo;

pH – Potencial Hidrogeniônico;

PPM – Potencial Produção de Metano;

R² – Coeficiente de determinação;

R²ajust – Coeficiente de determinação ajustado;

REE – Receita de energia elétrica;

RMB – Rendimento médio de biogás;

RMSE – Raiz quadrada do erro médio;

SA – Sulfato de amônio;

SELIC – Taxa do Sistema Especial de Liquidação de Custódia;
SF – Sólidos Fixos;
SPAC's – Sistemas de Produção de Animais Confinados;
SS – Supersimples;
ST – Sólidos Totais;
SV – Sólidos Voláteis;
TEE – Tarifa de energia elétrica praticada pela concessionária;
TIR – Taxa interna de retorno;
TMA - Taxa mínima de atratividade;
TMA – Taxa mínima de atratividade;
TRH – Tempo de Retenção hidráulica;
UC – Unidade Crechária;
UPD – Unidade Produtora de Desmamados;
UPL – Unidade Produtora de Leitões;
UT – Unidade de Terminação;
VPL - Valor Presente Líquido;
Zn – Zinco.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA SUINOCULTURA (ARS).....	23
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA COMO ESTRATÉGIA DE ECONOMIA CIRCULAR NA GESTÃO DOS RESÍDUOS DE SPAC'S	24
3.3 IMPORTÂNCIA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	26
3.4 PARÂMETROS IMPORTANTES PARA O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	26
3.5 TIPOS DE ABÓBORA CULTIVADAS NO BRASIL	30
3.6 CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS <i>CUCURBITAS</i>	33
3.7 CENÁRIO DO CULTIVO DE ABÓBORAS	33
3.8 COOPERATIVAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS	34
3.9 ANÁLISE CINÉTICA DO ENSAIO DE POTENCIAL PRODUÇÃO DE METANO	35
3.10 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA.....	36
4 MATERIAL E MÉTODOS	38
4.1 LOCAL DE ESTUDO.....	38
4.2 SUBSTRATOS E INÓCULO	38
4.3 ENSAIO DE POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO (PPM).....	41
4.3.1 Caracterização dos substratos e inóculo utilizados no ensaio de PPM....	42
4.3.2 Monitoramento e composição do biogás no ensaio de PPM	43
4.3.3 Análise Cinética do ensaio de PPM	44
4.3.4 Avaliação dos modelos do ensaio de PPM	45
4.4 ENSAIO SEMICONTÍNUO	46
4.4.1 Caracterização dos substratos e inóculo utilizados no ensaio semicontínuo	48
4.4.2 Monitoramento do biogás no ensaio semicontínuo.....	49
4.5 MÉTODOS ANALÍTICOS	51
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	54

4.7 ESTUDO DE VIABILIDADE FINANCEIRA DOS CENÁRIOS DE CODIGESTÃO, COM ARS, DE VARIEDADES DE ABÓBORAS COMO CULTURAS ENERGÉTICAS	54
4.7.1 Dimensionamento dos biodigestores para os cenários	55
4.7.2 Receitas / ingressos.....	57
4.7.2.1 Rendimento do biogás.....	58
4.7.2.2 Rendimento do biofertilizante	60
4.7.3 Despesas.....	62
4.7.3.1 Custos de produção das culturas energéticas.....	62
4.7.3.2 Custos com tratamento térmico das culturas energéticas	64
4.7.3.3 Custos de Investimentos com os biodigestores e conjuntos motogeradores	65
4.7.3.4 Custos de manutenção e operação dos biodigestores e motogeradores.....	66
4.7.3.5 Custos de depreciação.....	67
4. 7.4 Indicadores econômicos	67
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO	70
5.1.1 Volume acumulado e produção específica de biogás e metano.....	70
5.1.2 Rendimento de metano.....	71
5.1.3 Análise Cinética.....	74
5.1.4 Avaliação dos modelos.....	80
5.2 ENSAIO SEMICONTÍNUO	81
5.2.1 Produção específica de biogás e metano	81
5.2.2 Eficiência de remoção de material orgânico no ensaio semicontínuo.....	82
5.2.3 pH, alcalinidade parcial, alcalinidade total, acidez volátil e relação AV/AT	85
5.2.4 Ácidos Graxos Voláteis	87
5.2.5 Valorização agronômica do biofertilizante no ensaio semicontínuo	91
5.2.6 Índice de Germinação, pH e condutividade elétrica.....	95
5.2.7 Análise de viabilidade financeira	97
6 CONCLUSÃO	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE.....	113

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética para viabilizar os diferentes segmentos do agronegócio justifica a busca por estratégias que visam incrementar o aporte energético, principalmente quando essas estão em consonância com as bases da Economia Circular (EC).

A Digestão Anaeróbia (DA) é um dos processos de conversão bioquímica de componentes orgânicos em biogás. Basicamente, consiste em uma mistura de metano, Dióxido de Carbono (CO_2) e biofertilizante – fertilizante orgânico líquido. A DA começa com a hidrólise, que é a quebra de macromoléculas de proteínas, carboidratos e lipídios em moléculas simples de aminoácidos, glicose, ácidos graxos e glicerol. Os próximos estágios são a acidogênese e acetogênese, nos quais as moléculas hidrolisadas são transformadas em Ácidos Graxos Voláteis (AGV), principalmente acetato, hidrogênio e CO_2 . Finalmente, ocorre a metanogênese para converter esses elementos em metano (Gómez Camacho *et al.*, 2019).

O processo de DA, atualmente, é amplamente empregado para promover o saneamento ambiental e a recuperação agronômica e energética de diferentes resíduos provenientes de Sistemas de Produção de Animais Confinados (SPAC's), como a Água Residuária da Suinocultura – ARS (Steil, 2001; Souza *et al.*, 2005; Orrico Junior *et al.*, 2009; Orrico Júnior *et al.*, 2010).

Entretanto, visando incrementar a produção de energia, algumas usinas de biogás recorrem à adição de Culturas Energéticas (CE), tornando o processo de DA mais atraente devido ao alto rendimento de biogás por tonelada de matéria fresca. Além disso, quando a DA é misturada com dejetos animais – tornando-se uma Codigestão Anaeróbica (CoDA –, essa pode atingir proporções adequadas de Carbono para Nitrogênio (C:N) (Velásquez Piñas *et al.*, 2018).

O uso de CE em CoDA com dejetos animais é, portanto, estratégico para promover tanto o saneamento ambiental como para incrementar a geração de biogás e biofertilizante, fortalecendo o conceito de EC. Ademais, a adição de CE ao processo de CoDa pode auxiliar no equilíbrio da relação C:N, bem como melhorar a eficiência dos biodigestores na degradação dos resíduos e aumentar os rendimentos de biogás e a qualidade do biofertilizante, uma vez que estabelece condições sinérgicas ao desempenho da comunidade microbiana (Damaceno *et al.*, 2019b; Montoro, 2020).

As características das CE para uso em CoDA remetem a rusticidade, alta produtividade, fonte de carboidrato e fibras. Estudos recentes, realizados no Brasil, demonstram o aumento do potencial de geração de energia com o uso de batata-doce em CoDA com lodo de flotador (Damaceno *et al.*, 2019a; 2019b) e com água residuária da bovinocultura de leite (Montoro *et al.*, 2019); caldo de cana-de-açúcar em CoDA com lodo de flotador (Restrepo, 2019); e mandioca e batata-doce em CoDA com cama de frango (Montoro, 2020).

Visando ampliar as opções de CE para produção de energia em CoDA com resíduos de SPAC's, têm-se as Abóboras Paulista Secas (*Cucurbita moschata* Duch) e a Moranga (*Cucurbita máxima* Duch), do gênero *Cucurbita sp.*, que são olerícolas comumente cultivadas para alimentação humana e animal em propriedades rurais no Brasil. Essas espécies apresentam composição nutricional com potencial promissor à produção de biogás/metano e biofertilizante.

As *Cucurbitas* são de culturas anuais, tendo assim potencial de produção em todas as estações do ano, de norte a sul do Brasil (Nick; Borém, 2017). Isso é o que as tornam uma alternativa de biomassa para uso em CoDA com resíduos de SPAC's, como as ARS. A adição de *Cucurbitas* em CoDA com a ARS permite a geração de energia limpa e a reciclagem de nutrientes, além do desenvolvimento agrícola com efeitos locais, do fornecimento de energia elétrica a muitas propriedades rurais ainda desassistidas, sendo, também, uma alternativa aos anseios de segurança energética, assim como observado por Montoro *et al.* (2019), ao realizarem o emprego de batata doce como CE.

Entretanto, poucos estudos da adição de *Cucurbitas* na produção de biogás são encontrados. Nesse sentido, podem-se citar três estudos em que cascas de Abóbora Flutada (*Telfairia occidentalis*) foram submetidas à Monodigestão Anaeróbia (MonoDA) ou à CoDa com esterco de aves (Dahunsi *et al.*, 2016; Dahunsi *et al.*, 2018; Dahunsi *et al.*, 2019). Como conclusão em todos os artigos publicados, os autores mencionam o potencial da casca de abóbora para geração de energia, o efeito positivo dos pré-tratamentos e o sinergismo entre os substratos em CoDA.

Assim, considerando a consulta na literatura atual, realizou-se, nesta investigação, a primeira tentativa de usar duas variedades de abóbora, submetidas a pré-tratamentos físicos e térmicos em CoDA, com ARS como substrato, para a produção de biogás, podendo isso contribuir para o aumento da área superficial e para a melhoria da degradação por ação microbiana, além da quebra da resistência de

material recalcitrante, favorecendo a DA. Além disso, até então, não havia estudos sobre análises de viabilidade técnica e financeira de sua aplicação como CE em processos de CoDA com resíduos de SPAC's.

A viabilidade técnica e financeira do emprego de Abóbora Paulista e Moranga na CoDA contribui para a reciclagem da ARS, sendo assim um incentivo à valorização agronômica das variedades dessas *Cucurbitaceas*, proporcionando a produção e a manutenção da diversidade dessa olerícola. Além do mais, permite a redução dos impactos ambientais, principalmente com a geração de produtos de alto valor agregado, como o biogás e o biofertilizante.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de duas variedades de abóbora (Paulista Seca e Moranga) como CE em CoDA, com ARS, para tratamento de substratos e produção de biogás e biofertilizante, visando a viabilidade financeira de diferentes cenários de projeto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Mensurar a geração de biogás e estabelecer o valor energético pelo Potencial Produção de Metano (PPM);
- b) Avaliar o desempenho da CoDA, com ARS, de *Cucurbitas* em reatores de bancada, sob o regime de alimentação semicontínua;
- c) Avaliar os efeitos do pré-tratamento térmico (cozimento) em conjunto com físico (trituração);
- d) Analisar modelos cinéticos aplicáveis aos tratamentos em MonoDA e CoDA;
- e) Verificar a viabilidade técnica e financeira da CoDA de *Cucurbita*, com ARS, para geração de biogás e biofertilizante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA SUINOCULTURA (ARS)

A produção de carne suína no mundo contabilizou 115,22 milhões de toneladas em 2023. Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2024), o Brasil se encontra na quarta posição no *ranking* mundial, com produção de 5,15 milhões de toneladas, atrás de China, Estados Unidos e União Europeia. O relatório ainda aponta que o país conta com a maior produção do território nacional na região sul, com abate de 72,9% (ABPA, 2024).

A expansão da produção de suínos nos últimos dez anos promoveu o desenvolvimento socioeconômico do setor, no entanto, também trouxe consequências como os impactos ambientais devido ao aumento da geração de resíduos. A problemática ambiental é em razão das elevadas concentrações orgânicas presentes nas águas residuárias, geradas nos processos de lavagem das baias para retirada de fezes, urinas e restos de alimentos e compostas por elevados micronutrientes, como Carga Orgânica (matéria carbonácea), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), entre outros, que resultam na produção de Gases de Efeito Estufa (GEEs) e no risco de transmissão de doenças (Dal Bosco *et al.*; 2016; Ito *et al.*, 2016).

As características físicas, químicas e biológicas das ARS são variáveis, pois dependem das estruturas e do manejo dos dejetos nos sistemas de produção. Também, estão sujeitas à fase fisiológica do ciclo produtivo, às características dos animais, às condições ambientais e aos sistemas de tratamentos associados (Souza *et al.*, 2016; Adnane *et al.*, 2024).

Sobre as fases fisiológicas, as unidades de confinamento podem ser divididas em: a) Ciclo Completo (CC), que compreende todos os ciclos de produção; b) Unidade Produtora de Leitões (UPL), correspondente à reprodução, à maternidade e ao desmame de leitões, sendo composta por matrizes reprodutoras de forma permanente e leitões, com idades entre 21 a 28 dias, até atingirem o peso médio de 5 a 8 quilos; c) Unidade Produtora de Desmamados (UPD), relacionada aos cuidados com leitões desmamados, a partir de 5 quilos, até atingirem cerca de 25 quilos; d) Unidade Crechária (UC), na qual os leitões permanecem após o desmame, possuindo de 8 a 25 quilos; e, por último, e) Unidade de Terminação (UT), na qual os leitões passam a

engordar a partir dos 25 quilos até atingirem, aproximadamente, 120 quilos, em um período que pode chegar a 140 dias.

3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA COMO ESTRATÉGIA DE ECONOMIA CIRCULAR NA GESTÃO DOS RESÍDUOS DE SPAC'S

Com o aumento das demandas de mercados por fontes de proteínas e com o surgimento das criações em regimes intensivos, os problemas relacionados a poluição ambiental aumentaram. Atrelado a isso, ocorre a geração de grandes quantidades de dejetos em pequenas áreas, acompanhada, muitas vezes, do manejo inadequado de resíduos (Ito *et al.*, 2016).

Entretanto, as ARS se apresentam como potencial fonte de biomassa à geração de energia sustentável (Matinc *et al.*, 2017), uma vez que a conversão biológica (Digestão Anaeróbia – DA) se traduz como uma alternativa tecnológica de tratamento e mitigação de impactos ambientais. Isso se deve a sua capacidade de produção de biogás de elevada importância energética e biofertilizante de grande relevância agrônômica (Dhanalakshmi; Ramanujam, 2012).

Cabe destacar que os anseios por segurança energética e sustentabilidade nos processos de geração de energia suscitaram, a partir da Crise do Petróleo, em 1970, a produção de energia por meio de fontes renováveis. Embora tais conceitos tenham ganhado força, as políticas de consolidação por origens alternativas se tornaram pouco efetivas com o passar do tempo, requerendo fomento na atualidade (Karp; Halford, 2011).

Porém o termo Economia Circular (EC), ao longo dos anos, se destaca, no meio político e acadêmico, com a conotação de que resíduos de processos produtivos sejam incorporados aos ciclos naturais e industriais. A premissa é que, de forma regeneradora ou restauradora, seja possível extinguir o desperdício e instaurar o ciclo de vida de produtos em cadeia circular, a processos similares aos que ocorrem na natureza, fazendo com que se estabeleça, assim, além do aumento da produção e do crescimento econômico, a manutenção do equilíbrio ambiental (Blázquez *et al.*, 2018).

No contexto da EC, a conversão biológica de biomassa a biogás e biofertilizante possibilita que resíduos orgânicos de processos agroindustriais sejam biodegradados por DA (Karp; Halford, 2011). Sendo isso feito com recuperação a um baixo custo

energético e com estratégias de reciclagem de produtos de alto valor agregado (Dhanalakshmi; Ramanujam, 2012; Matinc *et al.*, 2017).

A DA, por sua vez, é composta por dois fenômenos: digestão ácida e fermentação metânica. No primeiro, ocorre a transformação de compostos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, em substâncias e compostos mais simples, principalmente ácidos orgânicos, havendo a síntese de material celular e compostos intermediários.

Além do mais, a digestão ácida é realizada por microrganismos facultativos (bactérias acidogênicas) na ausência de Oxigênio Dissolvido (OD) (Foresti *et al.*, 1999; Steil, 2001; Aquino *et al.*, 2007; Teperino *et al.*, 2017). Logo, para que ocorra o processo de conversão de compostos complexos para compostos mais simples, a digestão ácida passa pelas etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e homoacetogênese (Foresti *et al.*, 1999; Aquino *et al.*, 2007; Steil, 2001; Teperino *et al.*, 2017).

Já no segundo fenômeno, fermentação metânica, as arqueias metanogênicas, estritamente anaeróbias, transformam os ácidos orgânicos formados na digestão ácida em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (Foresti *et al.*, 1999; Jordão; Pessoa, 2005; Teperino *et al.*, 2017). Contudo, vale ressaltar que os microrganismos metanogênicos são divididos, conforme sua via metabólica, em dois grupos: a) acetoclásticos, responsáveis pela conversão do acetato a metano, correspondente a maior parte do metano que é produzido (70%); e b) hidrogenotróficos, encarregados da redução de CO_2 , convertendo hidrogênio à cerca dos 30% restantes de metano (Aquino *et al.*, 2007).

Os microrganismos acetoclásticos são mais sensíveis às mudanças de Potencial Hidrogeniônico (pH) e à elevada concentração de amônia (NH_3^+). Nesse sentido, substratos com essas características favorecem a predominância de microrganismos hidrogenotróficos, os quais utilizam hidrogênio e CO_2 produzido pela oxidação do acetato para a produção de metano (Beraud-Martínez *et al.*, 2024; Kunz *et al.*, 2022).

Entretanto, a geração de biogás, com elevado potencial energético (em torno de 70% de CH_4), e biofertilizante, com propriedades agronômicas, depende das características dos substratos (Karp; Halford, 2011). Portanto, é imprescindível estabelecer uma relação de equilíbrio entre os compostos orgânicos presentes no substrato.

3.3 IMPORTÂNCIA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA

Muitas vezes, a DA com um único substrato (MonoDA) não atinge um rendimento adequado de biogás e estabilização da carga orgânica, por não dispor dos nutrientes necessários ao metabolismo dos consórcios microbianos. Nesse caso, ocasiona-se a ineficiência dos processos que entram em desequilíbrio ou colapso (Koo *et al.*, 2017; Kumar; Samadder, 2020).

Assim, por meio da combinação de dois ou mais substratos ao processo que se denomina CoDA, torna-se estabelecer uma relação de equilíbrio entre compostos lignocelulósicos, nitrogenados, lipídicos, açúcares e outros. Ademais, é possível proporcionar uma adequada relação C:N, bem como capacidade tampão adequada, maior estabilidade de processos, menor efeito de inibição (Salama *et al.*, 2019; Damaceno *et al.*, 2020; Kurade *et al.*, 2020), e obtenção de rendimento superior ao da MonoDA – entre 25% e 400% a mais (Kumar; Samadder, 2020).

3.4 PARÂMETROS IMPORTANTES PARA O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

A degradação dos substratos e a separação dos constituintes da parede celular de materiais de origem vegetal podem representar etapas críticas e complexas. Isso ocorre devido as características estruturais do material lignocelulósico, que abrange cristalinidade da celulose, grau de polimerização, volume de poros, grau de lignificação, área superficial acessível e tamanho de partícula (Ram; Nikhil, 2022).

Dessa forma, esses fatores podem obstruir a biodegradabilidade das frações celulósicas e hemicelulósicas, impedindo o ataque microbiano na DA (Adnane *et al.*, 2024). Para tanto, muitas vezes, o pré-tratamento dos substratos resulta em uma alternativa estratégica a fim de diminuir a recalcitrância e melhorar a taxa de produtividade do biogás (Rosa *et al.*, 2023).

As principais técnicas de pré-tratamento são: biológicas, como fungos, ensilagem, enzimas e consórcio microbiano; físicas, como extrusão, cominuição, micro-ondas e cavitação; químicas, como ácido, álcali, ozonólise, líquidos iônicos; e combinatórias, como explosão de fibra de NH_3^+ (Adnane *et al.*, 2024).

A DA, como já exposto, é composta pelas etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, cujo equilíbrio entre essas determina a eficiência do processo. Para garantir que as fases da DA ocorram de forma equilibrada, é imprescindível o monitoramento de alguns parâmetros, como o pH, a temperatura, a relação C:N, o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), a alcalinidade, entre outros, para que, quando necessário, sejam adotadas alternativas de adequação em tempo hábil (Adnane *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a temperatura é um dos principais parâmetros intervenientes do processo, pois a atividade microbiana, bem como sua composição, requer uma temperatura ótima entre 25 °C e 40 °C (Ram; Nikhil, 2022) para a decomposição dos substratos em biodigestores. Por se tratar de um consórcio microbiano mesofílico, temperaturas inferiores a 15 °C inibem a ação microbiológica e podem comprometer os processos (Steil, 2001).

O pH é outro fator determinante no processo de digestão anaeróbia, pois apresenta relação direta com o equilíbrio químico do consórcio microbiano, portanto, torna-se imprescindível que sua manutenção compreenda entre 6 e 8 (Damaceno *et al.*, 2019a). No entanto, o pH depende da composição dos substratos utilizados na alimentação do biodigestor, em que a relação C:N determina as velocidades das reações (Dupont *et al.*, 2020; Adnane *et al.*, 2024).

Isso ocorre, pois, se essa relação estiver em desequilíbrio, com maior proporção de matéria carbonácea lábil, por exemplo, ela favorecerá uma rápida hidrólise. Logo, os carboidratos, que são os primeiros metabolizados pelos microrganismos (Deng *et al.*, 2023), contribuirão para o acúmulo de ácidos orgânicos de cadeias curtas, como lático, acético, propiônico, butírico, entre outros.

Embora a formação intermediária dos ácidos na fase acidogênica seja parte natural e essencial do processo de DA, o problema consiste no acúmulo desses, que pode ser evitado com a proporção adequada de substratos de fonte nitrogenada. Isso é possível uma vez que as proteínas presentes são metabolizadas a aminoácidos, promovendo a captura dos íons de hidrogênio (H) e CO₂ presentes no meio reacional em desequilíbrio, transformando-os em íons de hidróxido (OH⁻), íons de bicarbonato (HCO₃⁻) e íons de carbonato (CO₃²⁻).

Esses íons possuem efeito de tamponamento, neutralizando os ácidos na fase acetogênica e reestabelecendo, assim, o equilíbrio entre as concentrações de ácidos e carbonatos, fornecendo condições adequadas de pH a etapa metanogênica. Em

contrapartida, uma relação C:N baixa, indica a presença de concentrações elevadas de N no sistema, comparadas a disponibilidade de Carbono, podendo incorrer em inibições devido a concentrações elevadas de NH_3^+ , as quais são tóxicas aos microrganismos (Wu *et al.*, 2019).

Ocorre que as concentrações elevadas de N fazem com que o consumo microbiano seja mais rápido e, embora haja um efeito imediato e positivo na taxa de produção de metano, com o tempo, como consequência da ausência de carbono, há a diminuição da formação dos ácidos. Como resultado, há a elevação do pH, promovendo, assim, o acúmulo de N na forma de NH_3^+ , que podem resultar na inibição da produção de biogás (Damaceno *et al.*, 2019; Ram; Nikhil, 2022), mesmo com a capacidade de adaptação microbiana a condições extremas.

Nesse sentido, os excessos de carbono ou N produzem efeitos deletérios a DA, portanto, antes de iniciar o monitoramento dos parâmetros, é necessário garantir condições de manutenção desses. Como uma das principais medidas, é estabelecida uma relação ótima de C:N dos substratos, entre 16 e 35, na qual o carbono compõe a principal fonte de energia para o crescimento microbiano. No entanto, o N atua na síntese de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e na manutenção das condições de pH neutro no digestor, devido a sua capacidade tampão (Ram; Nikhil, 2022; Adnane *et al.*, 2024).

Cabe destacar que a relação C:N pode variar de acordo com a natureza do substrato, sendo que, para a ARS da suinocultura, normalmente, é encontrada uma relação C:N entre 14 e 20, sendo essa ainda viável a DA pela degradabilidade e alcalinidade.

Com a partida do reator e o início da DA, as análises de monitoramento de pH, alcalinidade intermediária e parcial devem compor a rotina diária de operações do sistema, utilizando-as com indicadores da estabilidade do processo, além de servirem para a adoção de alternativas operacionais a fim de evitar colapsos no sistema e garantir melhor eficiência dos processos.

Geralmente, a faixa de pH ótima é de 6,0 a 8,0, sendo que valores acima ou abaixo podem afetar o processo de DA, causando a redução da produção de metano (Gunes *et al.*, 2019) quando associados ao acúmulo de ácidos voláteis (ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico) ou ao excesso de NH_3^+ . Para tanto, é essencial neutralizar os ácidos e evitar mudanças no pH, uma vez que as principais moléculas que fornecem alcalinidade ao sistema são: carbonato de cálcio (CaCO_3), íons de

hidróxido (OH^-), íons de bicarbonato (HCO_3^-) e íons de carbonato (CO_3^{2-}) (Kunz *et al.*, 2019).

Na DA, a faixa ideal de alcalinidade situa-se entre 1.000,00 e 5.000,00mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ (Rosa *et al.*, 2023), enquanto a de acidez, mensurada pela concentração de AGVs, é de até 3.000mg. L^{-1} de AV, segundo Cremonez *et al.* (2019), com relação AV/AT ótima em torno de 0,3.

Embora biodigestores anaeróbios sejam sistemas projetados para remoção de matéria orgânica, os nutrientes são essenciais para a conversão da matéria carbonácea para biogás, atuando como cofatores em reações enzimáticas. Contudo, esses podem causar efeitos inibitórios dependendo das concentrações (Ram; Nikhil, 2022).

Os macronutrientes, N, P e K, são indispensáveis na biomassa e atuam como agentes de tamponamento, enquanto os macronutrientes secundários e os micronutrientes, Sódio (Na), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn), são essenciais para as reações enzimáticas envolvidas na formação de metano (Adnane *et al.*, 2024).

O N, além de propiciar condições de tamponamento que resultam diretamente na geração do metano, é essencial para o crescimento dos microrganismos, sendo capaz de otimizar a degradação da Matéria Orgânica (MO). Atrelado a isso, P contribui para a realização das atividades metabólicas dos microrganismos, como a produção de Adenosina Trifosfática (ATP), indispensável para o crescimento e o desenvolvimento de plantas e animais (Shim *et al.*, 2021).

Dessa forma, P torna-se um elemento de amplo interesse agrônomo, embora a principal forma de extração é por meio de fontes não renováveis, que muitas vezes possuem restrição geográfica, fazendo com que os atuais padrões de consumo levem a escassez (Shim *et al.*, 2024). Assim, a reciclagem desse elemento, mediante biomassa de resíduos em CoDA com CE, é uma alternativa sustentável que atende aos interesses agrônômicos e está em consonância com a EC.

Somando-se a isso, nutrientes como K tem um papel importante nas atividades metabólicas dos microrganismos por regularem o equilíbrio osmótico. Contudo, em altas concentrações, podem promover a deterioração de sistemas anaeróbios. Zhang e Jahng (2010) comprovam que teores de K de 2 a 4g. L^{-1} podem ter ação inibitória da atividade metanogênica de 5% a 15% em digestor anaeróbio.

A concentração de Sólidos Totais (ST) está relacionada a fração orgânica disponível para o sistema, logo, com relação direta a produção de biogás. Concentrações elevadas de sólidos, além de possibilitarem o acúmulo de ácidos, podem ocasionar a formação de banco de sólidos no biodigestor e interferir no TRH levando a, conseqüentemente, eficiência da DA. Entretanto, uma subcarga no sistema também pode reduzir a produção de biogás. Em sistema de digestão anaeróbia com tecnologia de fluxo tubular (*Plug-flow*), que não inclui a homogeneização da massa no biodigestor, é recomendado o teor de 6% a 10% de ST.

O TRH do efluente no ST também pode ser limitante e causar desequilíbrios no processo por causa de em dimensões incompatíveis pelo tempo de detenção do efluente no sistema para biodegradação ou, ainda, pela manutenção inadequada, que culmina no acúmulo de lodo em excesso, reduzindo o volume útil do sistema. Como consequência disso, há o surgimento de caminhos preferenciais, reduzindo também esse TRH.

Além disso, no processo de DA o número de espécies de bactérias acidogênicas é maior que as metanogênicas, portanto, em reatores com TRH baixo, ocorre a inibição do consumo de carbono na etapa metanogênica, ou seja, há um comprometimento na produção de biogás (Cavalcante *et al.*, 2017). Nesse sentido, é necessário conhecer as características operacionais dos biodigestores e realizar um monitoramento contínuo para, se necessário, implementar medidas de otimização de processos ou unidades complementares de tratamento, a fim de garantir que os efluentes possam ser reintroduzidos no ciclo, agregando valores a cadeia produtiva, ao invés de serem passivos ambientais.

3.5 TIPOS DE ABÓBORA CULTIVADAS NO BRASIL

Nativas das Américas, abóboras e morangas, juntamente com melão, melancia, pepino e cabaças, pertencem a família das *Cucurbitaceae*. Os registros arqueológicos da existência dessas olerícolas são de 10 mil anos e indicam que essas compunham a base alimentar dos povos Olmecas e de seus sucessores, Incas, Astecas e Maias (Nick, Borém, 2017).

O gênero *Cucurbita* é composto por 24 espécies, sendo 5 dessas cultivadas no Brasil (domesticadas): *Cucurbita máxima* (morangas), *Cucurbita moschata* (abóboras), *Cucurbita ficifolia* (gilas), *Cucurbita argyrosperma* (abóboras ornamentais)

e *Cucurbita pepo* (mogangos), e com utilizações diversas, servido como alimento funcional ou medicinal para humanos e animais (Barbosa, 2009; Barbieri, 2012; Nick; Borém, 2017).

O fruto apresenta diversos tamanhos e formatos, como globular, oval, pescoço de ganso, pescoço torto, entre outras variações (Mcgregor, 1976). Em algumas populações, o formato determina o aproveitamento: os achatados consumidos como verduras e doces, enquanto as piriformes e elipsóides servem para a alimentação animal, principalmente de bovinos e suínos (Barbosa, 2009; Barbieri, 2012).

No Brasil, as espécies de importância econômica de maior cultivo são as *C. moschata*, *C. máxima*, *C. pepo* (Mcgregor, 1976; Nick; Borém, 2017; Mukherjee *et al.*, 2022). Os principais produtores são os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Paraná, com cerca de 82% da produção nacional (IBGE, 2017), conforme apresentado na Tabela 1, detendo 92% do total comercializado nas Centrais Estaduais de Abastecimento – Ceasas (Hortifruti Brasil, 2018). Referente ao último censo no IBGE (2017), constavam apenas informações sobre abobrinhas, sendo que informações sobre abóboras, morangas e jerimuns foram apresentadas pela última vez no censo de 2006.

Consideradas hortaliças de alto valor nutritivo e baixas calorias, as abóboras possuem um aproveitamento bastante versátil em saladas, cozidos, tortas, doces, guisados, extração de azeite, panificação, fins ornamentais, entre outras funções que incluem as partes aéreas (folhas, flores e brotos) e as sementes e polpas. Essas últimas se destacam devido às características nutricionais, e sensoriais e aos componentes bioativos importantes à saúde, como as vitaminas B2, C e E e os carotenoides, que são precursores da vitamina A e superam os teores encontrados na cenoura (Barbosa, 2009; Gomes, 2017; Abra; Carvalho, 2020; Rico *et. al.*, 2020).

Tabela 1 – Número de estabelecimentos, produção em toneladas, área em hectares e produtividade em t.ha⁻¹ das culturas de abobrinha.

Região	Número de Estabelecimentos	Produção (t)
Brasil	34.848	228.943
Norte	2.635	2.776
Rondônia	1.025	1163
Acre	108	56
Amazonas	261	384
Roraima	75	144
Pará	628	528
Amapá	34	74

Tocantins	504	428
Nordeste	2.617	5.034
Maranhão	173	164
Piauí	194	68
Ceará	310	954
Rio Grande do Norte	44	41
Paraíba	148	390
Pernambuco	267	717
Alagoas	108	22
Sergipe	37	39
Bahia	1.336	2.641
Sudeste	15.636	179.375
Minas Gerais	6.871	30.207
Espírito Santo	1.497	6.937
Rio de Janeiro	2.412	92.480
São Paulo	4.856	49.752
SUL	9.857	23.611
Paraná	4.508	14.788
Santa Catarina	3.789	6.211
Rio Grande do Sul	1.560	2.613
Centro-oeste	4.103	18.145
Mato Grosso do Sul	853	1.862
Mato Grosso	1.407	2.620
Goiás	1.261	7.718
Distrito federal	582	5.946

Fonte: IBGE (2017).

No Brasil, há o cultivo de 88,2 mil hectares (ha) de abóboras por ano, em uma ampla variedade genética de espécies crioulas mantidas pelos agricultores em todas as regiões do país (Priori *et al.*, 2012; Nick; Borém, 2017). Responsável pela produção de 228.943 toneladas, conforme apresentado na Tabela 1 (IBGE, 2017), o comércio de abóbora apresenta papel fundamental na geração de emprego e renda de muitos agricultores familiares.

Aliado a redução de deficiências de micronutrientes em humanos, outras vantagens dessa olerícola são a boa aceitabilidade por produtores e consumidores, o elevado potencial produtivo e de rentabilidade nas regiões de cultivo, mesmo sob condições de baixos níveis tecnológicos, além de que, possibilita longos períodos de armazenamento (Gomes, 2017).

Assim, cultivos de abóbora movimentam o agronegócio familiar e empresarial brasileiro nas regiões nordeste, norte e centro-sul do país onde se concentram os maiores volumes de produção e conferindo a elas valor econômico e social por meio da geração de empregos diretos e indiretos, devido a mão-de-obra necessária no ciclo produtivo que vai do cultivo à comercialização (Barbosa, 2009; Abra; Carvalho, 2020).

Portanto, os recursos genéticos do gênero *Cucurbita* são de extrema importância para a agricultura familiar e para a segurança alimentar.

3.6 CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS CUCURBITAS

As *Cucurbitas* são culturas anuais, em que a parte vegetativa, a floração e a frutificação têm desenvolvimento simultâneo. Possuem raízes adventícias nos pontos de contato com o solo e caule herbáceo, rasteiros (*C. moschata*) ou trepadeiras, que permite que subam por meio de gavinhas, simples ou ramificadas, enraizando-se em nós. Apresentam ramas espessas para o armazenamento de nutrientes e água, com extensões que podem atingir de 6 metros, as mais curtas (Mukherjee *et al.*, 2022), a 15 metros, as mais longas (Mcgregor, 1976).

As *Cucurbitas* apresentam elevada variação genética no que tange a adaptação as condições edafoclimáticas, ciclos fenológicos, hábitos de crescimento, caracteres morfológicos, características nutricionais, resistência a doenças, coloração de polpa e frutos, texturas, formas e sabores (Nick; Borém, 2017).

As *Cucurbitáceas* são vegetais de elevado teor nutritivo, com alto nível de vitamina A, tiamina, niacina, vitamina B6, ferro, magnésio e fósforo, vitamina C, vitamina E, potássio, cobre e manganês, além de que a polpa é uma fonte de fibra alimentar e as sementes possuem gordura, altos níveis de proteína, magnésio e zinco (Mukherjee *et al.*, 2022).

Em base seca, apresentaM valores nutricionais de carboidratos (3,5-4%), fibras (0,74%), cinzas (1%), proteínas (0,30% - 0,50%), com relevantes teores de minerais como K (42194,00 mg.kg⁻¹), Ca (6684,85 mg.kg⁻¹), P (3040,48 mg.kg⁻¹), Mg (1590,40 mg.kg⁻¹), Fe (31,69 mg.kg⁻¹), Zn (23.88 mg.kg⁻¹), Cu (8.44 mg.kg⁻¹) e Mn (3.33 mg.kg⁻¹) (Barbosa, 2009; Gomes, 2017).

3.7 CENÁRIO DO CULTIVO DE ABÓBORAS

Estima-se que a área mundial de cultivo das principais cucurbitáceas seja de aproximadamente 2 milhões de hectares, com produção mundial estimada em 26,67 milhões de toneladas (Amaro *et al.*, 2021), com uma produtividade média de 13,4 t ha⁻¹ de *Cucurbita moschata* (Gomes, 2017) e 20,65 t ha⁻¹ de *Cucurbita maxima* (Resende *et al.*; 1996).

De 2009 para 2019, a produção mundial de *Cucurbita* teve crescimento 2,62%, de 22,3 para 22,9 milhões toneladas (Tabela 3), com as maiores produções na China (29%) (Gomes, 2017; FAO, 2019). Contudo, na estimativa da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2019), não consta dados da produção do Brasil e de outros países, conforme apresentado na Tabela 2.

O crescimento na produção se deve, em grande parte, a inclusão de abóboras em dietas saudáveis. Porém, parte da produção das *Cucurbitas* não têm aproveitamento, ocorrendo o descarte dos vegetais que não atendem as demandas estéticas do mercado, ou, ainda, de partes subutilizadas, como cascas e sementes, que juntas podem atingir até 25% da produção.

Tabela 2 Produção em toneladas, área em hectares e produtividade em t.ha⁻¹ das culturas de abóbora, moranga e jerimum nos principais países produtores no mundo, em 2019.

País	Ranking	Produção (t)	Área (ha)	Produtividade (t.ha ⁻¹)
China	1º	8427676	453104	18.60
China continental	2º	8376151	450622	18.59
Ucrânia	3º	1346160	62800	21.44
Federação Russa	4º	1195611	56088	21.32
Espanha	5º	734640	14950	49.14
México	6º	679145	33941	20.01
Bangladesh	7º	634951	58378	10.88
Estados Unidos	8º	610120	24767	24.63
Turquia	9º	590414	126200	4.68
Itália	10º	569120	19080	29.83
Indonésia	11º	522486	8385	62.31

Fonte: FAO (2019).

Embora haja uma diversidade imensa de espécies de *Cucurbitas* nas regiões brasileiras, pouco se sabe sobre a diversidade genética devido às poucas pesquisas sobre o melhoramento genético para atingir a alta produtividade e garantir a ampla variabilidade dessa espécie (Amaro *et al.*, 2021).

3.8 COOPERATIVAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS

A Associação Cooperativa foi criada e regulamentada no Brasil, pela Lei nº 5.764, de 16 de dezembro de 1971, integrante do terceiro setor, em que os cooperados, de forma voluntária, exercem uma atividade econômica, sem objetivo de lucro, cujos resultados obtidos são divididos proporcionalmente entre os membros

dessa sociedade, com vistas a promover a inclusão social e uma melhor distribuição de renda (Giroto; Silva, 2019).

As cooperativas podem, por sua natureza jurídica, proceder de atos cooperativos, caracterizado por atos realizado em cumprimento do objeto social, praticado entre as cooperativas e seus associados, e pelas cooperativas entre si, quando associadas, não abrangendo as transações entre a cooperativa e terceiros não associados, sendo os não cooperativos, aqueles além do objeto social que abranjam terceiros (Brasil, 1971). Nesse contexto, a renda tributável nas cooperativas será em resultados positivos obtidos pelas cooperativas nas operações com terceiros, havendo a isenção de imposto de renda e contribuição social sobre o lucro líquido, em atos cooperativos (Paes, 2014).

A crescente integração na cadeia produtiva de carne suína no Brasil, contribui para os bons desempenhos econômicos no cenário internacional, e isso devido a mudanças estruturais com aumento de escala, especialização e tecnificação (Saab *et al.*, 2009). Essas tendências se relacionam às estruturas, principalmente daquelas que atuam em sistemas de integração, porque permite coordenar estruturas dos agentes à montante (produtores rurais, indústria de insumos), e ao atingir uma produção altamente organizada, possibilita grande poder de barganha com elos à jusante (atacado, varejo), aumentando a eficiência desde o fornecimento de insumos a produtores até a comercialização do produto (Buranello *et al.*, 2020).

3.9 ANÁLISE CINÉTICA DO ENSAIO DE POTENCIAL PRODUÇÃO DE METANO

O PPM é uma das melhores formas de avaliar o potencial energético, em termos de geração de metano de qualquer resíduo ou biomassa, por um tempo específico, em escala de laboratório. Embora seja um experimento simples, fornece informações essenciais como a viabilidade técnica de uso da matéria-prima selecionada a DA, as condições operacionais mais adequadas para sua realização, como a taxa de degradação e de conversão em matéria orgânica em metano e conhecer as proporções mais adequadas dos substratos de interesse, informações essenciais à aplicação do projeto de DA em escala real (Sillero; Solera; Perez, 2022).

Para avaliações cinéticas, modelos matemáticos mais simples e aplicáveis foram desenvolvidos com o passar dos anos, assumindo que a taxa de produção de biogás é equivalente a uma taxa específica de crescimento de microrganismos

metanogênicos nos reatores (Liew *et al.*, 2021). Apesar disso, um modelo cinético permite compreender parâmetros essenciais à DA e prever, com precisão, o desempenho de um reator para estudo piloto de aumento de escala (Liew *et al.*, 2021).

Dependendo do modelo, é possível extrair informações como produção específica de biogás no tempo, potencial máximo de geração de biogás, tempo da fase *lag*, taxa máxima de produção de biogás, constante cinética e a relação da produção de biogás com a atividade microbiana (Egwu *et al.*, 2021; Liew *et al.*, 2021; Meneses-Quelal *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021; Karki *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022; Sillero; Solera; Perez; 2022, Vannarath; Talla, 2022).

Para identificar o modelo mais adequado ao experimento, podem ser utilizadas métricas de validação dos ajustes, que consistem em medidas de quantificação. Dependendo das variáveis do experimento, um ou outro modelo pode apresentar maior viabilidade conforme o tratamento, ainda que no mesmo experimento, tendo em vista que as diferentes variáveis possuem relação direta com processo de DA, na fase *lag*, no potencial de produção cumulativa de biogás, na taxa máxima de produção de biogás e consequentemente no modelo.

Assim, a tomada de decisão sobre o modelo mais adequado à cada tratamento é pautado em um conjunto de métricas, em que cada uma tem o papel de avaliar aspectos diferentes da modelagem, algumas mais robustas que outras, mas importante que nunca utilizada uma única métrica como critério de análise (Karki *et al.*, 2022).

Desse modo, as análises da qualidade dos ajustes e as avaliações do quanto os modelos cinéticos descrevem os processos de biodigestão anaeróbia são baseadas em parâmetros dos modelos e em valores das funções dos resíduos (erro), considerando a menor diferença entre os resultados experimentais e previstos (Karki *et al.*, 2022).

3.10 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA

A análise econômico-financeira de um projeto consiste em estimar todas as entradas e saídas (receitas e despesas) iniciais relacionadas a um dado investimento, operação e manutenção, em um dado intervalo de tempo (Duarte Junior, 2024).

Por meio das estimativas, geram-se os Fluxos de Caixa Livre (FCL), com os quais é possível avaliar o saldo na empresa, e aplicar os indicadores econômicos e

avaliar a viabilidade de investimento no projeto (Assaf Neto, 2019). Como uma segmentação do FCL, há o Fluxo de Caixa Descontado (FCD), que leva em consideração no presente, os benefícios futuros que poderão ser obtidos e Assaf Neto, 2019), com desconto apropriado de uma taxa que represente os riscos inerentes aos fluxos estimados (Montoro, 2017; Duarte Junior, 2024).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE ESTUDO

Os ensaios de MonoDA e CoDA foram realizados em escala de bancada no Laboratório de Análises de Resíduos Agroindustriais (LARA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel.

O município de Cascavel situa-se geograficamente entre as coordenadas 24° 57' 21" S de latitude e 53° 27' 19" W de longitude. O clima predominante da região do município, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é o Cfa - Clima Subtropical Mesotérmico. Dessa forma, os verões são quentes e as geadas pouco frequentes, com tendência de concentração de chuvas no verão e não apresenta estação seca definida. A média de temperatura anual é de 20°C e a pressão atmosférica média anual é de 936,34 hPa (IAPAR, 2019).

4.2 SUBSTRATOS E INÓCULO

A ARS utilizada durante o experimento foi coletada em três etapas, de uma unidade produtora de leitões (UPL), em uma cooperativa localizada no município de Cascavel – PR.

A escolha da UPL como origem de ARS usada no abastecimento do experimento, foi por essa apresentar a menor variação das fases fisiológicas dos suínos (matrizes permanentes e leitões até 8 Kg), visando garantir homogeneidade das características físico-químicas das ARS entre as coletas.

Ainda no intuito de que as ARS armazenadas para uso durante o experimento mantivessem iguais características após cada coleta, essas foram envasadas em garrafas PET, mediante constante homogeneização, e congeladas em freezer. As culturas energéticas empregadas em codigestão com a ARS foram duas variedades de abóbora, *Cucurbita moschata* (abóbora paulista seca) e *Cucurbita máxima* (abóbora moranga) (Figura 1a e b).

Figura 1 Variedades de abóboras: a) *Cucurbita moschata* (abóbora paulista seca) e b) *Cucurbita maxima* (abóbora moranga).



Fonte: Compilação da autora¹.

As abóboras foram provenientes de duas fontes: algumas foram adquiridas na Central de Abastecimento (CEASA) de Cascavel e outras na da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), referentes a um projeto de avaliação pós-colheita de abóbora cabotiá, que utilizou no plantio direto a variedade moranga como polinizadora.

As dimensões médias das variedades de abóboras utilizadas no experimento, foram mensuradas em laboratório com auxílio de uma balança analítica de precisão, paquímetro, trena e barbante (Figura 2).

Figura 2 Caracterização das abóboras a) paulista seca e b) moranga, quanto as dimensões de perímetro, espessura da casca e polpa, pesos da polpa, semente, casca e total.



Fonte: A autora (2024).

As dimensões médias das abóboras apresentaram composição correspondente a 77,4% e 83,2% de polpa, 3,4% e 10,6% de sementes e 19,1% e

¹ Montagem a partir das imagens coletadas nos sites: FazFácil.com e TostPost.com (2024).

6,3% de cascas, para as variedades paulista e moranga, respectivamente, conforme os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Dimensões médias ($n = 6$) das variedades de Abóboras Paulista Secas (APs) e Moranga, utilizadas no experimento.

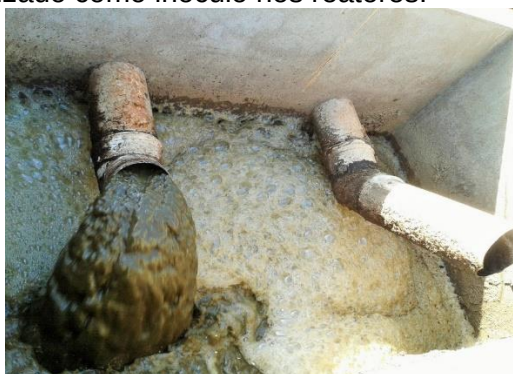
Tipo	Peso (kg)				Espessura (cm)		Diâmetro (cm)		Perímetro (cm)
	Polpa	Semente	Casca	Total	Casca	Polpa	Vazio	Total	
APs	0,4±0,2	0,2±0,1	0,1±0,3	0,49±2,6	0,3±0,1	1,2±0,4	4,8±0,8	6,9±0,8	41,3±7,5
AM	2,3±0,4	0,3±0,7	0,2±0,3	2,78±3,5	0,2±0,0	3,7±0,8	8,6±1,8	15,5±1,8	63,2±8,4

Fonte: A autora (2024).

Para o ensaio de CoDA, as abóboras foram trituradas à granulometria aproximada de 2 mm de diâmetro, com casca e sementes, retirando apenas os talos, utilizando o triturador de resíduos orgânicos, da marca TRAPP, modelo TR200. Após trituradas, parte das abóboras cruas foram reservadas e a outra parcela, cozida a 70°C, por 29 minutos ($\pm 5,8$), sem a adição de qualquer substância. Ambas frações, crua e cozida, foram congeladas em freezer, em embalagens de polietileno.

Como inóculo foi utilizado biofertilizante de um biodigestor anaeróbio (Figura 3) de uma unidade de produção de leite, localizada no município de Céu Azul, Paraná.

Figura 3 Biofertilizante utilizado como inóculo nos reatores.



Fonte: A autora (2024).

O biodigestor, modelo Tubular Horizontal, é dotado de agitação mecânica, abastecido em sistema contínuo e recebe as dejeções de vacas leiteiras, cuja alimentação consiste em uma mistura de silagem e concentrado. O biofertilizante coletado foi peneirado em uma malha de 3mm para reter o material fibroso remanescente.

4.3 ENSAIO DE POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO (PPM)

O ensaio para determinação do PPM foi realizado de acordo com a norma alemã VDI 4630 (2006), por meio de DA, em batelada, triplicata e em frascos reatores de vidro âmbar, com capacidade total de 1000mL cada, sendo aproximadamente 500mL de volume útil e 500mL de *headspace* para armazenamento do biogás, conforme a Figura 4.

Figura 4 Frascos âmbar a serem utilizados no experimento.



Fonte: A autora (2024).

O ensaio foi composto pelos seguintes tratamentos:

T₀: MonoDA da ARS

T₁: CoDA da ARS + abóbora paulista seca triturada e crua (ACr)

T₂: CoDA da ARS + abóbora paulista seca e cozida (ACo)

T₃: CoDA da ARS + abóbora moranga triturada e crua (MCr)

T₄: CoDA da ARS + abóbora moranga triturada e cozida (MCo)

Além dos referidos tratamentos, três frascos reatores adicionais foram utilizados para avaliar a atividade biológica do inóculo, utilizando celulose microcristalina (20 µm de diâmetro) como amostra de referência a fim de validar a eficácia do inóculo utilizado nos testes. Outros três frascos reatores foram abastecidos apenas com inóculo para descontar a produção endógena de biogás.

4.3.1 Caracterização dos substratos e inóculo utilizados no ensaio de PPM

Realizou-se uma caracterização inicial da ARS e das variedades de abóboras e do inóculo separadamente e das diferentes misturas no início do processo, em termos de ST e SV, pela técnica gravimétrica usando uma balança de precisão de 0,001 g, da marca Tecnal®, Mark 210 A, de acordo com os métodos do APHA-AWWA-WPFC (2005), para se estabelecer a composição dos substratos dos reatores (Tabela 4):

Tabela 4 Determinação de sólidos, matéria natural e volume das ARS e CE para o ensaio de PPM, para carga de abastecimento orgânico equivalente a 4,8% de ST.

Configurações	RSPAC e CE		Carga de abastecimento dos reatores batelada					
	ST (%)	SV (%)	ST (%)	MN (g)*	V. ARS (mL)	V. subs. (mL)	V. inóc. (mL)	V. total (mL)
ARS UPL	0,8	66,8	0,8	-	250	250	200	450
Abóbora Paulista crua	15,9	90,2	4,0	12,6	37,4	50	200	250
Abóbora Paulista cozida	17,3	90,2	4,0	11,5	38,5	50	200	250
Abóbora Moranga crua	8,2	87,8	4,0	24,3	25,7	50	200	250
Abóbora Moranga cozida	9,4	89,4	4,0	21,3	28,7	50	200	250

RSPAC e CE: resíduos de sistemas de produção animais confinados e culturas energéticas; ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; MN: matéria natural das CE; V. ARS: volume de água residuária da suinocultura; V. subs.: volume do substrato; V. inóc.: volume de inóculo; V. total: volume total, considerando substrato (ARS + CE) e inóculo;

MN (g)*: a determinação da matéria natural foi realizada na unidade de medida gramas (g), e admitido como densidade 1, para computo no volume total do reator em mL.

Fonte: A autora (2024).

Para a composição do substrato, admitiu-se teor de ST em cada reator inferior a 10%, e os sólidos voláteis do inóculo entre 1,5 a 2,0% do conteúdo total do teste, com proporções entre os SV do inóculo e do substrato maior ou igual a 2,0, conforme configurações da Tabela 5, em conformidade com a norma VDI 4630 (2006).

Adicionada a amostra, cada frasco foi vedado e acoplado ao sistema de vedação tipo rosca, contendo uma agulha conectada a uma mangueira de silicone com válvula abre/fecha, seguida de duas ramificações do tipo cateter com sistema de fechamento, que possibilitou a aferição da produção de biogás.

Tabela 5 Configurações experimentais do ensaio de PPM.

Configurações	ST (%)	SV (%)	Inóculo			Substrato			$SV_{inóc} / SV_{subs}$	ST total no reator (%)
			Massa (g)	ST (g)	SV (g)	Massa (g)	ST (g)	SV (g)		
T ₀ - MonoDA ARS UPL	0,8	66,8	200	6,2	3,9	250	2,0	1,3	2,9	1,8
T ₁ - CoDA ARS + ACr	3,5	88,6	200	6,2	3,9	50	1,8	1,6	2,5	3,2
T ₂ - CoDA ARS + ACo	3,9	88,8	200	6,2	3,9	50	1,9	1,7	2,3	3,2
T ₃ - CoDA ARS + MCr	2,9	86,8	200	6,2	3,9	50	1,5	1,3	3,1	3,1
T ₄ - CoDA ARS + MCo	3,0	87,9	200	6,2	3,9	50	1,5	1,3	3,0	3,1

ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; $SV_{inóc}$: sólidos voláteis do inóculo; SV_{subs} : sólidos voláteis do substrato.

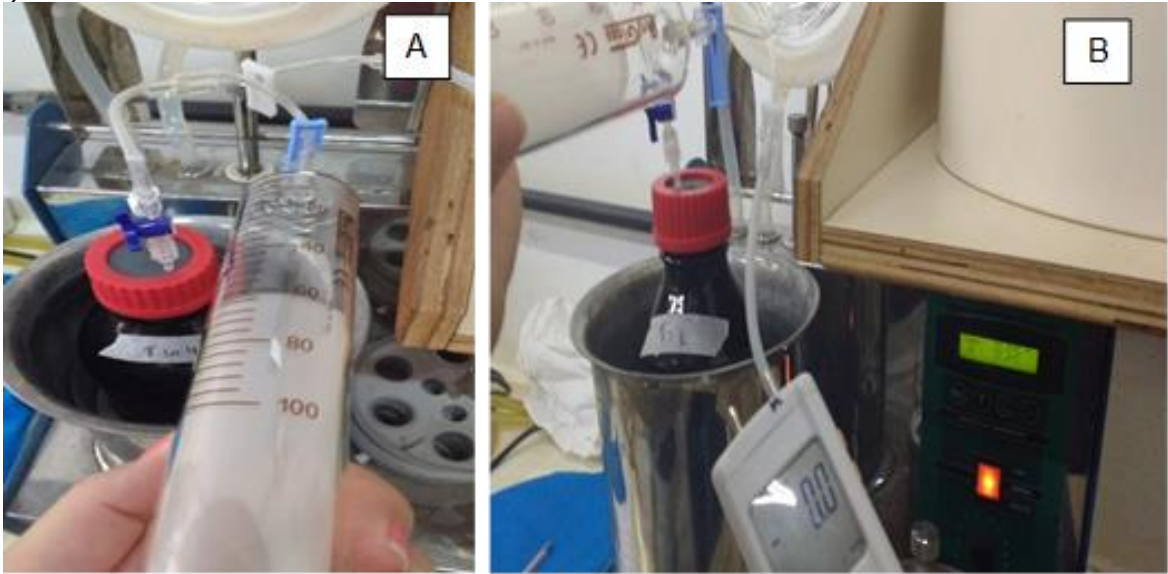
Fonte: A autora (2024).

O ensaio foi conduzido em temperatura mesofílica (37°C), por 47 dias, muito embora o período de interesse consistiu na produção diária maior que 1% do volume acumulado de biogás (VDI, 2006).

4.3.2 Monitoramento e composição do biogás no ensaio de PPM

Após 24 horas da incubação do ensaio, iniciaram-se as medições diárias de biogás, com auxílio de uma seringa de vidro, própria para esse fim (Figura 5a), e um manômetro *auto-off* Neda 1604 IEC 6F22 (Figura 5b), para correção das pressões internas e externas aos frascos reatores.

Figura 5 Sistema de aferição de medição de biogás: seringa de vidro (A) e manômetro digital (B).



Fonte: A autora (2024).

O volume de biogás produzido foi monitorado diariamente e padronizado nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), por meio da Equação 1.

$$V_0 = V \cdot \frac{(P_L - P_W) \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

V_0 - volume de biogás padronizado (mL);

V - volume de biogás registrado (mL);

P_L - pressão atmosférica no momento do registro (mbar);

P_W - pressão de vapor da água (mbar);

T_0 - temperatura normalizada (273 K);

P_0 - pressão normalizada (1,013 mbar);

T - temperatura ambiente (K).

A determinação da composição do biogás (CH_4 e CO_2) foi realizada por meio de um cromatógrafo de gás (modelo GC-2014, Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, MD, EUA) equipado com uma coluna Carboxen® 1000 Plot (4,5m, 2,10mm). As temperaturas do injetor e do detector foram mantidas a 100 e 150°C, respectivamente.

A temperatura inicial da coluna foi de 40°C e aquecida a 145°C (adaptado de Penteado *et al.*, 2013). A calibração do cromatógrafo foi realizada com gás padrão de biogás contendo $2 \pm 0,02\%$ de oxigênio, $8 \pm 0,1\%$ de nitrogênio, $55 \pm 1,0\%$ de metano e $35 \pm 0,7\%$ de dióxido de carbono.

4.3.3 Análise Cinética do ensaio de PPM

Para a análise cinética dos resultados de produção de biogás e metano do ensaio de PPM, utilizou-se o *software Statística®*, Stat Soft, versão 10.0.0 (1984), com a aplicação da ferramenta avançada de estimativa de modelos de regressão não linear, por mínimos quadrados, estimado pelo método de *Gauss-Newton*, com 10.000 iterações e 10 critérios de convergência.

Para tanto, no intuito de selecionar pelo menos um modelo com ajuste adequado às observações experimentais, neste estudo foram aplicados cinco modelos matemáticos convencionais simplificados, amplamente utilizados em

MonoDA e CoDA, que foram: Gompertz modificado (Sillero; Solera; Perez, 2022) (Equação 2); Cone (Karki *et al.*, 2022) (Equação 3); Primeira Ordem modificado (Santos *et al.*, 2022) (Equação 4); Logístico (Liew *et al.*, 2021) (Equação 5); e Logístico modificado (Karki *et al.*, 2022) (Equação 6), conforme apresentado a seguir:

$$H(t) = P \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \cdot e}{P} \cdot (\lambda - T) + 1 \right] \right\} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$H(t) = \left[\frac{P}{1 + (KT)^{-n}} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

$$H(t) = P[1 - \exp(-KT)] \quad (\text{Eq. 4})$$

$$H(t) = \left[\frac{P}{1 + b \exp(-KT)} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

$$H(t) = \left[\frac{P}{1 + \exp \left(\frac{4R_m}{P} (\lambda - T) + 2 \right)} \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

H(t): produção específica de biogás (cumulativo) no tempo (t) (mL.g SV⁻¹);

P: potencial máximo de geração de biogás (mL.g SV⁻¹);

R_m: taxa máxima de geração de biogás (mL.g SV d⁻¹);

e: constante de Euler (2,718282);

b: constante (adimensional);

λ: fase *lag* durante a geração de biogás (d);

T: tempo necessário para a produção cumulativa de biogás (d).

K: constante cinética (1/dia);

n: fator de forma (adimensional).

4.3.4 Avaliação dos modelos do ensaio de PPM

Para identificar o modelo mais adequado ao experimento foram utilizadas métricas de validação dos ajustes, que consistem em medidas de quantificação. Dependendo das variáveis do experimento, um ou outro modelo pode apresentar

maior viabilidade conforme o tratamento, ainda que no mesmo experimento, tendo em vista que as diferentes variáveis possuem relação direta com processo de DA, na fase *lag*, no potencial de produção cumulativa de biogás, na taxa máxima de produção de biogás e consequentemente no modelo.

Assim, a tomada de decisão sobre o modelo mais adequado à cada tratamento foi pautada em um conjunto de métricas, em que cada uma teve o papel de avaliar aspectos diferentes da modelagem, algumas mais robustas que outras, mas importante que nunca utilizada uma única métrica como critério de análise (Karki *et al.*, 2022).

Desse modo, as análises da qualidade dos ajustes e as avaliações do quanto os modelos cinéticos descrevem os processos de DA foram realizadas com base em parâmetros dos modelos e em valores das funções dos resíduos (erro), considerando a menor diferença entre os resultados experimentais e previstos (Karki *et al.*, 2022), por meio das métricas diferença da produção acumulada de biogás, em percentual absoluto (% diferença P), ANOVA ($p\text{-valor} \leq 0,05$), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e raiz quadrada do erro médio (RMSE).

As métricas de % de diferença P e a análise de variância pelo teste *F*, tiveram a finalidade de indicar o quanto os resultados do modelo se ajustaram ao experimental, permitindo uma análise pontual desse modelo, enquanto as métricas R^2 , R^2_{ajust} e RMSE foram aplicadas para análises gerais de comparação entre modelos e úteis para a escolha daquele que teve o melhor ajuste (Karki *et al.*, 2022).

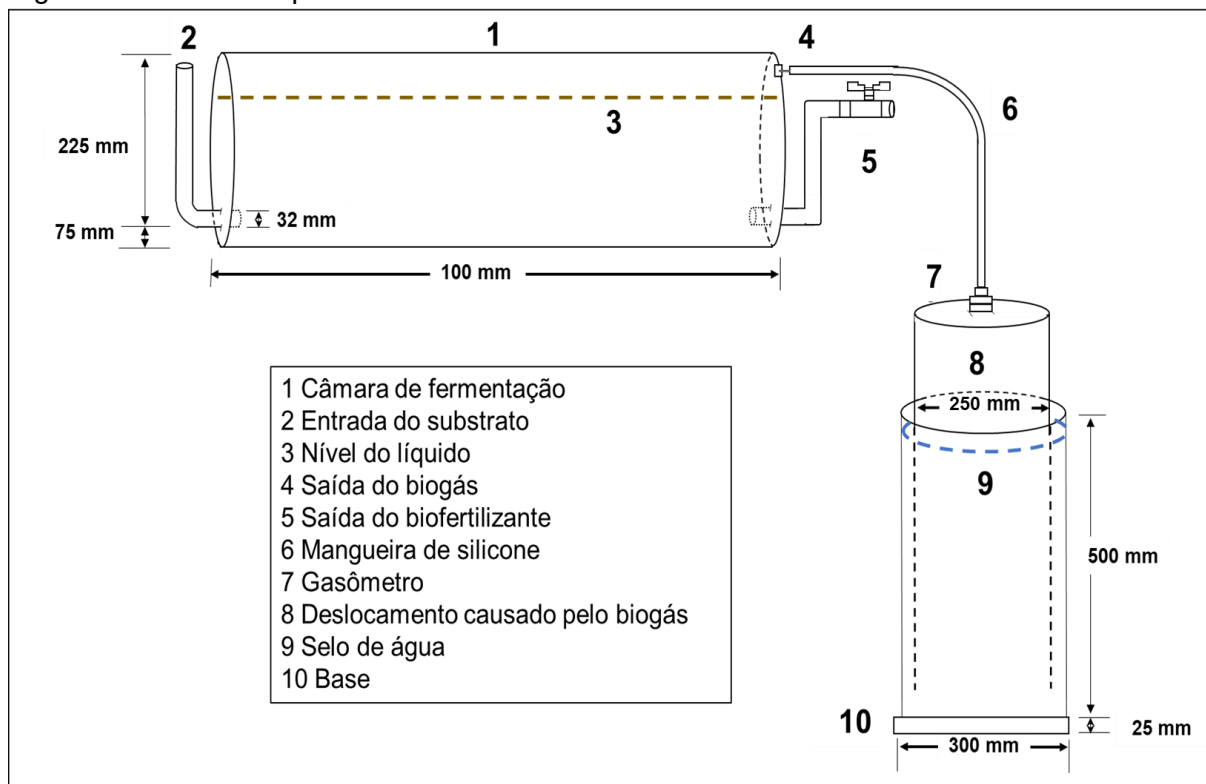
4.4 ENSAIO SEMICONTÍNUO

O ensaio semicontínuo foi desenvolvido sob uma configuração específica para avaliar qual dos substratos (MonoDA ou CoDA) apresentaria maior potencial de produção de biogás e metano e permitisse a realização de uma análise de viabilidade financeira a partir de diferentes cenários (tratamentos).

Os reatores utilizados para o ensaio semicontínuo foram de tubos de PVC, cuja ilustração esquemática é apresentada na Figura 6. Nestes reatores, a câmara digestora (de volume de trabalho de 60 litros), é separada do gasômetro. Os gasômetros consistem em dois tubos de PVC, um externo com 300 mm de diâmetro que foi preenchido com água e outro tubo com 250mm de diâmetro, que fica submerso na água para mensurar os deslocamentos causados pelo gás produzido na câmara

digestora e encaminhado ao gasômetro. Na região externa do gasômetro é fixada uma régua graduada de 30cm para auxiliar na determinação dos deslocamentos.

Figura 6 Desenho esquemático do corte transversal do reator modelo semicontínuo.



Fonte: A autora (2024).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) foi de 30 dias, portanto, com o volume útil dos reatores de 60 litros, as alimentações/cargas diárias foram de 2000mL. A concentração de ST adotada para as cargas de alimentação foi de 5%. A temperatura dos reatores foi mantida em $37 \pm 1^\circ\text{C}$.

Em cinco reatores foram avaliados os seguintes tratamentos:

T₀: MonoDA ARS;

T₁: CoDA ARS + abóbora paulista seca triturada e crua (ACr);

T₂: CoDA ARS + abóbora paulista seca e cozida (ACo);

T₃: CoDA ARS + abóbora moranga triturada e crua (MCr);

T₄: CoDA ARS + abóbora moranga triturada e cozida (MCo).

Inicialmente, os cinco reatores foram totalmente preenchidos com inóculo e, quando cessou a produção remanescente de biogás desse, iniciaram-se as alimentações dos reatores. A fim de proporcionar maior estabilidade aos processos da DA, os ensaios de CoDA foram realizados em progressão de carga, que seguiu de

1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0%, 4,0% até que atingisse 5,0% de ST, percentual de interesse da pesquisa. A alteração de teor se dava quando a produção de biogás apresentava estabilização, com coeficiente de variação (CV) <10%, o que em média, variava cerca de 7 dias para alcançar.

Com abastecimento de cargas diárias contendo 5% de ST, provenientes de abóboras, quando os reatores alcançaram produção estacionária de biogás, isto é, quando o volume de biogás produzido diariamente apresentou CV inferior a 10%, foram iniciadas as determinações das variáveis de interesse, mantendo após isso, as faixas do experimento por 28 dias. As cargas de abastecimento eram preparadas em quantidades médias para 10 dias, com o auxílio de proveta e balança analítica de precisão, medindo a quantidade de ARS e abóbora equivalente a cada teor de ST almejado, e acondicionadas em garrafas PET, em freezer.

Para abastecimento do reator, todos os dias as cargas era previamente retiradas do freezer no final da tarde, para o descongelamento e abastecimento do dia seguinte. A alimentação do reator ocorria sempre às 7h00 da manhã, a qual antes era aquecida em banho-maria à temperatura de 37°C. À medida que procedia o abastecimento do reator com a carga de 2L, era retirado o volume equivalente de biofertilizante, necessários às análises.

4.4.1 Caracterização dos substratos e inóculo utilizados no ensaio semicontínuo

Com base na caracterização inicial da ARS e das variedades de abóboras, determinaram-se as quantidades de abóboras para compor as cargas de alimentação dos reatores, utilizadas nas progressões da CoDA, ao volume de 2000mL.d⁻¹ e a carga orgânica volumétrica (COV), admitindo o teor de interesse de 5% de ST (Tabela 6).

Tabela 6 Quantidade de matéria natural para composição das cargas de abastecimento de 2000 mL.d⁻¹, de 1,5% a 5,0% de ST, e COV para carga de 5% de SV.

Subst	ST em 100g MN (g)	Carga abast. (mL.d ⁻¹)	Quantidade de MN (g) de abóboras, em 2 L de carga de abastecimento, para % de ST						SV (%)	COV (Kg SV.m ⁻³ d ⁻¹)
			1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	4,0%	5,0%		
ARS	0,8	2000	-	-	-	-	-	-	66,8	0,2
ACr	15,9	2000	189,2	252,2	315,3	378,3	504,5	630,6	85,8	1,4
ACo	17,3	2000	173,1	230,8	288,5	346,2	461,6	577,0	88,3	1,5
MCr	8,2	2000	363,7	484,9	606,1	727,4	969,8	1212,3	84,6	1,4
MCo	9,4	2000	318,7	425,0	531,2	637,4	849,9	1062,4	83,1	1,4

Subst.: substrato; ARS: água residuária da suinocultura; ACr: Abóbora Paulista triturada e crua; ACo: Abóbora Paulista triturada e cozida; MCr: Abóbora Moranga triturada e crua; MCo: Abóbora Moranga triturada e cozida; ST: sólidos totais; MN: matéria natural; Carga abast.: carga de abastecimento; SV: sólidos voláteis; COV: carga orgânica volumétrica.
Fonte: A autora (2024).

Na Tabela 7, segue a caracterização físico-química dos substratos e inóculo.

Tabela 7 Caracterização físico-química das ARS, cargas de abastecimento e inóculo utilizados nos tratamentos, sob alimentação semicontínua.

Parâmetros	Inóculo	ARS 2	ARS 3	CT ₁	CT ₂	CT ₃	CT ₄
CE (mS.cm ⁻¹)	5,0±0,0	4,7±0,0	5,0±0,0	5,4±0,0	5,3±0,0	5,9±0,0	6,7±0,0
pH (upH)	8,6±0,1	7,7±0,2	7,4±0,0	4,7±0,0	4,3±0,0	4,7±0,1	4,9±0,0
Umid (% MN)	99,8±0,0	99,2±0,0	99,4±0,0	94,9±0,2	95,2±0,2	95,3±0,6	95,5±0,6
ST (% MN)	0,2±0,0	0,8±0,0	0,6±0,1	5,1±0,2	4,8±0,2	4,7±0,6	4,5±0,6
SV (% ST)	30,8±2,1	66,8±0,8	58,7±1,8	85,8±1,6	88,3±0,9	84,6±2,1	83,1±3,0
SF (% ST)	69,2±2,1	33,1±0,8	41,3±1,8	14,2±1,6	11,7±0,9	15,4±2,1	16,9±3,0
COT (% ST)	17,1±1,2	37,1±0,5	32,6±1,0	47,7±0,9	49,1±0,5	47,0±1,1	46,1±1,6
NTK (% ST)	1,8±0,1	3,6±0,1	4,8±0,1	4,5±0,0	4,5±0,0	4,1±0,1	3,7±0,0
C/N (adm)	9,5±0,5	10,3±0,3	6,7±0,1	10,6±0,2	11,0±0,1	11,6±0,3	12,4±0,4
Hem (% ST)	-	16,0±4,0	-	5,9±2,4	6,7±1,4	4,8±0,9	7,4±1,7
Cel (% ST)	-	5,5±1,6	-	14,2±1,1	11,9±0,3	17,3±0,4	18,2±0,7
Lign (% ST)	-	9,5±2,2	-	7,6±1,9	6,5±0,7	8,7±2,2	9,6±1,7
PT (g kgST ⁻¹)	16,3±1,2	30,1±2,2	27,4±1,3	7,4±0,4	6,8±0,9	3,9±0,3	3,8±0,2
KT (g kgST ⁻¹)	4,1±1,2	1,9±0,2	1,6±0,1	1,0±0,0	1,0±0,1	0,9±0,1	0,9±0,0
Fe (g kgST ⁻¹)	1,3±0,0	2,8±0,1	3,0±0,0	0,9±0,0	0,6±0,0	0,4±0,0	1,0±0,1
Mg (g kgST ⁻¹)	17,7±2,7	17,1±2,1	17,7±0,9	6,5±0,1	6,1±0,3	5,2±0,4	5,3±0,3
Mn (g kgST ⁻¹)	0,3±0,0	0,9±0,0	0,8±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0	0,0±0,0	0,1±0,0
Cu (g kgST ⁻¹)	0,4±0,0	1,2±0,3	0,9±0,1	0,3±0,1	0,1±0,1	0,2±0,1	0,1±0,1
Zn (g kgST ⁻¹)	1,8±0,2	6,0±1,1	7,5±0,6	2,0±0,6	1,2±0,7	16,9±8,9	21,5±1,2
Ca (g kgST ⁻¹)	77,8±13,7	78,5±11,1	72,2±1,1	38,6±2,2	36,5±1,3	35,7±0,9	35,9±0,9
Na (g kgST ⁻¹)	38,9±2,6	24,0±2,7	19,7±0,9	2,6±0,2	2,4±0,1	1,5±0,0	1,6±0,0

ARS 2: água residuária da suinocultura utilizada exclusivamente na monodigestão; ARS 3: água residuária da suinocultura utilizada para a composição das cargas da codigestão anaeróbia; CT₁: carga de abastecimento do T₁, contendo ARS 3 e abóbora paulista triturada e crua; CT₂: carga de abastecimento do T₂, contendo ARS 3 e abóbora paulista triturada e cozida; CT₃: carga de abastecimento do T₃, contendo ARS 3 e abóbora moranga triturada e crua; CT₄: carga de abastecimento do T₄, contendo ARS 3 e abóbora moranga triturada e cozida; CE: condutividade elétrica; pH: potencial hidrogeniônico; Umid: umidade; ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; SF: sólidos fixos; COT: carbono orgânico total; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; C/N: relação entre carbono e nitrogênio; Hem: hemicelulose; Cel: celulose; Lign: lignina; PT: fósforo total; KT: potássio total; Fe: ferro; Mg: magnésio; Mn: mangânes; Cu: cobre; Zn: zinco; Ca: cálcio; Na: sódio; Adm: admensional. Replicatas (n) = 2.

Fonte: A autora (2024).

4.4.2 Monitoramento do biogás no ensaio semicontínuo

Iniciada a alimentação dos reatores à 5% de ST e estabilizada a produção de biogás, o ensaio foi conduzido por 31 dias, com aferição diária do volume de biogás

gerado em cada tratamento. Com média de 2 gasômetros por reator, as aferições eram realizadas três vezes ao dia (manhã, tarde e noite), com esvaziamento subsequente às leituras.

Uma vez que os gasômetros possuíam formas cilíndricas, de dimensões conhecidas, a determinação do biogás foi calculada por meio da equação de volume para seções cilíndricas (Equação 7), levando em consideração os deslocamentos na seção meridional dos gasômetros (altura), mensurados diariamente por meio de régua graduada, afixadas nesses.

$$V = \pi r^2 h \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

V – volume (m³);

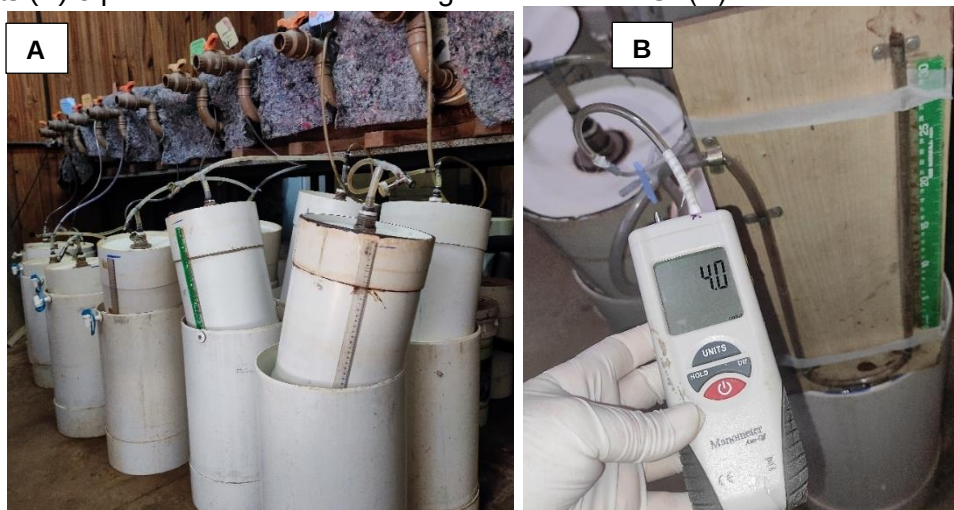
π – 3,14;

r – raio da seção cilíndrica;

h – perfil longitudinal de deslocamento do gasômetro (altura) (m).

A aferição das pressões internas aos gasômetros, foram realizadas por meio de tubo em “U”, e conferência por meio de um manômetro, em milímetros de coluna d’água (mmca). Essas foram corrigidas às condições normais de temperatura e pressão (CNTP), em 273K (0°C) e 10132,5 mmH₂O (1atm) (Figura 7), conforme a Equação 1.

Figura 7. Sistema de aferição de biogás no ensaio semicontínuo: gasômetros com réguas graduadas (A) e pressão via manômetro digital e tubo em “U” (B).



Fonte: A autora (2024).

Para a determinação da composição do biogás (CH₄ e CO₂), foram realizadas coletas por meio de seringas específicas para amostras gasosas, com injeção subsequente em um cromatógrafo de gás (modelo GC-2014, Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, MD, EUA).

4.5 MÉTODOS ANALÍTICOS

Para subsidiar a avaliação do desempenho dos processos de MonoDA e CoDA nos reatores, em laboratório, foram realizadas análises dos parâmetros de monitoramento de pH, condutividade elétrica (CdE), alcalinidade (AV/AT), série de sólidos, carbono orgânico total, relação de carbono/nitrogênio, frações de nitrogênio, fósforo (P), potássio (K), micronutrientes e metais, açúcares totais e específicos, ácidos graxos voláteis, índice de germinação (IG), conforme métodos discriminados na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 Metodologia de análises dos parâmetros de monitoramento e controle.

Parâmetro	Unidade	Método
Condutividade Elétrica (CdE)	uS.cm ⁻¹	condutivímetro (MS Tecnopon®, modelo mCA 150)
Ph	upH	pHmetro (TECNAL®, modelo TEC-3MP)
Umidade	%	SMEWW 2540 B e E. Gravimétrico (APHA, 1998)
Alcalinidade (AV/AT)	-	Titulométrico (RIPLEY <i>et al.</i> , 1986)
Série de Sólidos	% MN e % ST	SMEWW 2540 B e E. Gravimétrico (APHA, 1998)
Carbono Orgânico Total (COT)	% ST	Razão SV pela constante 1,8 (CARMO; SILVA, 2012)
Nitrogênio Amoniacal (N-amon) e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	% ST	SMEWW 4500 – Norg B. Macro Kjeldahl (APHA, 1999)
Relação Carbono/Nitrogênio (C:N)	%	Razão entre COT e NTK
Hemicelulose	% ST	Extração com detergente e ácido (VAN SOEST <i>et al.</i> , 1991)
Celulose	%ST	
Lignina	% ST	
Fósforo total (P)	mg.L ⁻¹	Digestão nítrico-perclórica e redução com ácido ascórbico (SMEWW 4500-P E.) (APHA, 1999)
Potássio total (K)	mg.L ⁻¹	Fotômetro de Chamas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997)
Ferro (Fe)	g kgST ⁻¹	Digestão nítrico-perclórica (APHA, 1999) e leitura em espectrômetro de absorção atômica (Shimadzu®, AA-6300)
Magnésio (Mg)	g kgST ⁻¹	
Manganês (Mn)	g kgST ⁻¹	
Cobre (Cu)	g kgST ⁻¹	
Zinco (Zn)	g kgST ⁻¹	

Cálcio (Ca)	g kgST ⁻¹	Digestão nítrico-perclórica, fotômetro de
Sódio (Na)	g kgST ⁻¹	chamas (APHA, 1999)
Açúcares Totais	mg.L ⁻¹ de ST	Dubois <i>et al.</i> (1956)
Açúcares específicos	mg.L ⁻¹ de ST	HPLC (Shimadzu®, 2010)
Ácidos graxos voláteis	mg.L ⁻¹ de ST	
Índice de germinação (IG)	%	Zucconi (1981)

Notas: (SMEWW) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Fonte: A autora (2024).

A série de sólidos incluiu os ST, SV e Sólidos Fixos (SF), além de Umidade e Carbono Orgânico Total (COT), ambos determinados pelo método gravimétrico, a partir da secagem (a 105°C por 24 horas) e queima em mufla (a 550°C por 2 horas) (APHA, 1999). As análises de açúcares específicos incluíram concentrações de glicose, frutose e arabinose, assim como os ácidos graxos voláteis (AGVs) na determinação dos ácidos láctico, fórmico, acético, propiônico e butírico.

Ambos, açúcares específicos e AGV foram determinadas por meio de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (Shimadzu® 2010), do inglês *high performance liquid chromatography* (HPLC), em que as amostras foram submetidas a filtração prévia, em membrana de fibra de vidro com porosidade de 0,2µm e acidificadas com solução de H₂SO₄ (2M) e levadas ao HPLC, equipado com coluna Aminex® HPX-87H (300mm, 7,8mm), forno CTO-20A a temperatura de 64°C, controlador CBM-20A, detector UV com arranjo de diodos SPD-20A em comprimento de onda de 208nm e bomba LC-20AT. A fase móvel utilizada foi água ultrapura Milli-Q (Millipore®) acidificada com 0,005 M de H₂SO₄, cujo volume de injeção de 20µL, em fluxo de 0,5mL.min⁻¹ (Lazaro *et al.*, 2012; Penteado *et al.*, 2013; Damaceno, 2018).

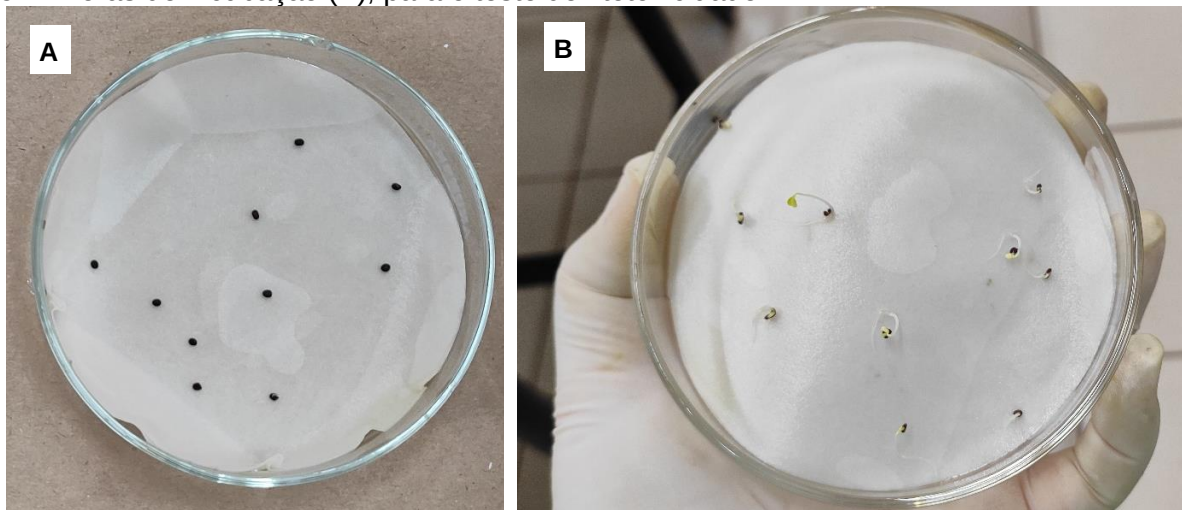
A partir das concentrações iniciais (C_i, antes da digestão anaeróbia) e das concentrações finais (C_F, após a digestão anaeróbia) dos parâmetros de ST, SV, carga orgânica volumétrica (COV) e açúcares, foram analisadas as eficiências de remoção de material orgânico, conforme Equação 8 a seguir (Jordão; Pessoa, 2005; Jin *et al.*, 2016).

$$E (\%) = \left(\frac{C_i - C_F}{C_i} \right) * 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

O grau de fitotoxicidade e fitoestimulância do biofertilizante foi realizado por meio do índice de germinação (IG), de acordo com a técnica empregada por Zucconi

et al. (1981), cuja avaliação utilizou o emprego de sementes de *Lepidium sativum* (agrião de jardim), o número de sementes germinadas e o comprimento da radícula (Figura 8).

Figura 8 Placa de Petri com as sementes de *Lepidium sativum* e extrato, antes (A) e depois de 72 horas de incubação (B), para o teste de fitotoxicidade.



Fonte: A autora (2024).

Para o teste, foram utilizadas 105 placas de Petri de 9,5mm de diâmetro (20 placas para cada tratamento, sendo 5 para cada repetição, mais 5 placas para o controle). Em cada placa foi adicionado papel filtro duplo, da marca Whatman nº 1 e em seguida, o conjunto placa de Petri + papel filtro foi esterilizado.

Cerca de 50mL dos biofertilizantes foram centrifugados a 3.500rpm, por 30min e filtrados em membrana de fibra de vidro com porosidade de 0,45µm, para obtenção de extrato concentrado, o qual foi diluído com água destilada, para aplicação na concentração de 15%. Foram realizados testes preliminares, nas concentrações de 50%, 25%, 20%, 10% e 5% a fim de se encontrar a faixa propícia ao teste.

O papel filtro em cada placa foi umedecido com 3mL do extrato, seguido da adição de 10 sementes de agrião, distribuídas de maneira uniforme. Para o ensaio de controle, foi utilizado apenas água destilada. Para evitar a desidratação durante o período de incubação, cada conjunto de placa de Petri foi embrulhado em plástico filme e submetido a câmara de germinação (BOD), a 23°C, sem fotoperíodo, durante 72 horas.

Ao final do teste, a avaliação consistiu na estimativa do número de sementes germinadas e o comprimento da radícula, com o índice calculado em % (Equação 9).

$$IG = \left(\frac{G_t}{G_c} * 100 \right) * \frac{L_t}{L_c} \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

IG - índice de germinação (%);

G_t - número de sementes germinadas no tratamento (adimensional);

G_c - média de sementes germinadas no controle (adimensional);

L_t - Comprimento médio das raízes germinadas no tratamento (cm);

L_c - Comprimento médio das médias das raízes germinadas no controle (cm).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental do ensaio foi realizado em faixas (*strip-plot*), para os cinco tratamentos T₀, T₁, T₂, T₃ e T₄, com 28 repetições, constituídas por análises diárias de biogás, com avaliação dos dados pelo software *Statistica*®, *Stat Soft*, versão 10.0.0 (1984), com análise de normalidade dos dados pelo teste de *Shapiro-Wilk*, análise de variância (ANOVA) e comparação múltipla de médias pelo teste *Tukey*, a 5% de probabilidade de erro.

Para os dados que não apresentaram distribuição normal, ainda que sob transformação, realizou-se ANOVA não paramétrica, com o teste de *Kruskal-Wallis*, com comparação múltiplas de amostras independentes, de classificações médias para todos os grupos, utilizando como referência a mediana, 1º e 3ª quartil.

4.7 ESTUDO DE VIABILIDADE FINANCEIRA DOS CENÁRIOS DE CODIGESTÃO, COM ARS, DE VARIEDADES DE ABÓBORAS COMO CULTURAS ENERGÉTICAS

O estudo de viabilidade financeira foi realizado com base nos resultados da produção de biogás, metano e biofertilizante referentes aos 5 tratamentos do ensaio semicontínuo. Esse contou com o levantamento das receitas, despesas, perdas e geração de valor a partir do investimento estimado para a implantação do biodigestor e conjunto motogerador, assim como a operação e manutenção desses em um panorama de 10 anos de vida útil de projeto, considerando o tempo de garantia do conjunto motogerador. As informações foram organizadas em planilhas de fluxo de

caixa, em que os custos foram representados por “despesas” e as entradas como “receitas”.

Para que as estimativas fossem mais próximas da realidade, na mesma cooperativa onde foram coletadas as amostras de ARS que abasteceram o experimento, e que se determinou vários parâmetros essenciais a análise técnica e financeira, foram obtidos os dados primários para a quantificação da ARS da UPL.

Geralmente as UPLs são constituídas para o fornecimento de grandes demandas de leitões, em sistemas de integração ou cooperativas, com o objetivo de estabelecer padrões de manejo e segurança zootécnica. Uma vez que os dados dessa pesquisa foram provenientes de uma cooperativa com este porte, os cenários foram dimensionados apenas para grande produtor, cuja quantidade de ARS gerada nessa, foi fixada para os 5 cenários.

Tendo em vista o faturamento anual da cooperativa, o sistema de tributação adotado foi o Lucro Real (Zanatta; Morone Neto, 2015), com alíquota de 15% em cima do lucro operacional e 9% sobre o capital social e lucro líquido.

4.7.1 Dimensionamento dos biodigestores para os cenários

A quantidade de água residuária gerada na cooperativa foi de 120.432L ARS.d⁻¹ estimada levando em consideração a quantidade de 2509 matrizes e a respectiva produção por essas matrizes, de 48L ARS.suíno d⁻¹ (Equação 10).

$$Quant. ARS UPL = QA * QD \quad (Eq. 10)$$

Sendo:

Quant. ARS UPL – quantidade de água residuária da suinocultura (L ARS.d⁻¹);

QA – quantidade de animais (matrizes) da granja (nº de suínos);

QD – quantidade de dejetos gerados por animais diariamente (L ARS.suínos d⁻¹).

Com os percentuais de ST de cada substrato, no volume real de ARS gerada e no TRH de 30 dias, foi possível determinar o volume dos biodigestores conforme a Tabela 10.

Sabendo que a ARS da UPL contém 0,8% de ST, calculado da quantidade de efluente real gerado, os ST corresponderam a 963,5 kg, admitindo a densidade 1, para a relação volume e massa (L:kg).

Tabela 9 Estimativas de volume dos biodigestores para a análise de viabilidade financeira, contendo como ST 0,8% no T₀ e 5% nos T₁, T₂, T₃ e T₄ e TRH 30 dias.

Cenário (Trat.)	Quant. ARS (L.d ⁻¹)	ST ARS e CE (%)	ST na ARS equiv. a 0.8% (Kg)	Quant. Abóbora MN para (Kg)	ST nas Abóbora s equiv. a 4.2% (Kg)	ST no biod. equiv. a 5% (Kg) (Soma do ST ARS + Abóbora)	Carga de abast. (ARS + Abóbora) (kg.d ⁻¹)	Volume do biodigestor (L)
T ₀	120432	0,8	963,5	0,0	0,0	963,5	120.432,00	3.612.960,0
T ₁	120432	15,9	963,5	31.895,2	1.339,6	2.303,1	152.327,24	4.569.817,2
T ₂	120432	17,3	963,5	29.187,6	1.225,9	2.189,3	149.619,65	4.488.589,4
T ₃	120432	8,2	963,5	61.318,6	2.575,4	3.538,8	181.750,55	5.452.516,6
T ₄	120432	9,4	963,5	53.737,5	2.257,0	3.220,4	174.169,55	5.225.086,5

Fonte: A autora (2024).

Além disso, foi necessário estabelecer as quantidades de abóboras em matéria natural (MN), conforme Equação 11.

$$Quant. CE MN = \left[\frac{Quant ARS * ST do biod.}{ST da CE} \right] \quad (Eq. 11)$$

Sendo:

Quant. CE MN – Quantidade de matéria natural das culturas energéticas (abóboras), para completar 5% de ST;

Quant. ARS – quantidade de ARS gerada na cooperativa (L.d⁻¹);

ST do biod. – percentual de 5% estabelecido como total para o biodigestor (%);

ST da CE – percentual de ST que contém na cultura energética (%).

Verificou-se que no processo de cocção houve uma perda de 7% e 6% de umidade nos T₂ e T₄, respectivamente. Assim, para se alcançar a mesma quantidade de MN, após o cálculo referente, aumentou a quantidade equivalente a estes percentuais nestes dois tratamentos.

Determinado a quantidade de MN das abóboras, realizou-se a quantificação dos ST em quilograma, correspondente a 4,2% Equação 12.

$$Quant. ST CE (Kg) = Quant MN * ST das CE no biod \quad (Eq. 12)$$

Sendo:

Quant. ST CE – quantidade de sólidos totais de culturas energéticas (kg de abóboras), em matéria natural (MN);

Quant. MN – quantidade de matéria natural da cultura energética (kg);

ST das CE no biod - 4,2% de ST das abóboras nos biodigestores (%).

A composição das cargas de abastecimento dos biodigestores à 5% de ST, nos tratamentos em CoDA, foi resultado da soma das quantidades de ARS com as quantidades de abóboras, que admitido o TRH de 30 dias, foi possível calcular o volume dos biodigestores, conforme a Equação 13.

$$Vol. Biod. (L) = Carga de Abast. * TRH \quad (Eq. 13)$$

Sendo:

Vol. Biod. – volume dos biodigestores (L);

Carga de abast. – carga de abastecimentos dos biodigestores, composta pela adição de ARS e abóbora ($kg.d^{-1}$);

TRH – tempo de retenção hidráulico de 30 dias (d).

4.7.2 Receitas / ingressos

A receita de cada cenário, ou ingresso como é conhecida no caso de cooperativas, foi estimada a partir dos rendimentos e valoração do biogás, usando como referência os valores de energia elétrica, em moeda corrente, que o investidor geraria em kWh provenientes da conversão do biogás, via motogerador.

A geração dessa energia limpa e renovável além de atribuir aspectos de sustentabilidade e governança (ESG) à cooperativa, proporciona outros benefícios como a diversificação das fontes energéticas para suprir as demandas internas, pois ao gerar a própria energia, a cooperativa adquire autonomia energética, garantindo a manutenção dos processos produtivos independente da concessionária.

Outra estimativa de receita consistiu no valor econômico que o biofertilizante apresenta em termos de equivalência nutricional (NPK) comparada aos insumos agropecuários comerciais: sulfato de amônia, superfosfato simples e cloreto de potássio. Ao aplicar o biofertilizante na propriedade rural, oriundo do sistema, há uma

redução direta dos custos por deixar de pagar pela aquisição de adubo mineral convencional. Em vista disso, a valoração se baseou nos preços do comércio regional, concernentes aos investimentos em insumos químicos que deixaram de ser comprados, computando como uma entrada para o empreendimento.

Acresce que, indiretamente o uso do biofertilizante culmina na redução de outros custos, como tornar desnecessário a construção de sistemas de tratamento subsequentes para a remoção de nutrientes do efluente, antes de sua disposição no meio, evitar custos por sanções administrativas, como a recuperação de áreas contaminadas e/ou eutrofizadas, além de furtar-se de perdas por embargo do empreendimento por danos ao meio ambiente. Porém, devido a subjetividade das situações elencadas, este estudo se limitou a receita/redução de custos da adubação com o emprego do biofertilizante.

4.7.2.1 Rendimento do biogás

A composição do biogás, gerado nos processos de DA, apresenta em média cerca de 60% de metano (Dalpaz, 2019), composto de alto valor calorífico, que pode ser transformado em energia elétrica e utilizado na cooperativa. Ao fazer uso desta energia gerada internamente, agrega-se valor à ARS, pois os custos que se teriam com energia fornecida pela concessionária, deixam de ser necessários, e os valores que custeariam a energia da rede, passam entrar como receita.

Assim, o biogás foi valorado a partir da conversão dos dados de potencial produção de biogás (PPB) levantados no ensaio semicontínuo, extrapolados para a quantidade de ARS gerada diariamente na UPL, conforme segue na Tabela 10.

Tabela 10 Estimativa de rendimento do biogás e valoração em energia elétrica.

Cen. (Trat.)	Potencial de Produção de Biogás (m ³ biogás.Kg ST ⁻¹ .ad)	ST no biod. equiv. a 5% (Kg) (Soma do ST ARS + Abóbora)	Rendimento médio de biogás (m ³ .dia ⁻¹)	Percentual médio de metano no biogás (%)	Conversão energética (Kwh. ano ⁻¹)	Tarifa Copel (R\$ kWh ⁻¹)	Receita de Energia Elétrica (R\$ ano ⁻¹)
T ₀	0,561	963,5	540,6	60,0	243.384,77	0,36	87.618,52
T ₁	0,529	2.303,1	1.219,0	60,0	978.888,94	0,36	352.400,02
T ₂	0,504	2.189,3	1.102,7	60,0	335.388,46	0,36	120.739,85
T ₃	0,868	3.538,8	3.071,5	60,0	6.315.471,43	0,36	2.273.569,72
T ₄	0,713	3.220,4	2.297,5	60,0	1.694.526,16	0,36	610.029,42

Cen. (Trat.): cenários (tratamentos); * No T2 e T4, para a cocção das abóbora, foi destinada a quantidade de biogás de 250.020,55 m³.ano⁻¹ e 453.483,09 m³.ano⁻¹, conforme estimativas

constantes no item 4.7.3.3. Portanto o valor constante na Tabela 10 referente a receita de energia elétrica é a diferença entre o total de biogás gerado e o consumido na cocção. Fonte: A autora (2024).

Para quantificar o rendimento médio de biogás (RMB), foram utilizados os dados de potencial de produção de biogás por quilograma de ST adicionados ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{STad}$) dos cinco tratamentos (T_0 , T_1 , T_2 , T_3 e T_4), do ensaio semicontínuo, assim como, as quantidades de ST estimada para as ARS dos cinco cenários.

Assim, a produção volumétrica em cada cenário foi resultado do produto (Equação 14):

$$RMB = PPB * ST \text{ no biod.} \quad (\text{Eq. 14})$$

Sendo:

RMB – rendimento médio de biogás (m^3 biogás);

PPB – potencial de produção de biogás (m^3 biogás.Kg ST^{-1}ad);

ST no biod. – sólidos totais presentes na ARS gerada na cooperativa (Kg ST).

Para converter o biogás em energia elétrica, utilizou-se os rendimentos médios de biogás (RMB) gerados em cada cenário anualmente, convertendo-os a energia elétrica através do percentual médio de metano no biogás, potência dos motogeradores (75 kW para o motogerador de 94 kVA e 132 kW para o de 165 kVA), somando as potencias daqueles com mais de um motogerador (Equação 15):

(Eq. 15)

$$CBE = \left(\frac{RMB * 365}{\%CH_4} \right) * P$$

Sendo:

CBE – conversão de biogás a energia elétrica ($\text{kWh} \cdot \text{a}^{-1}$);

RMB – rendimento médio de biogás (m^3 biogás. d^{-1});

365 – quantidade de dias no ano;

P – potência do motogerador (kW).

A tarifa de energia elétrica adotada foi a praticada pela concessionária responsável pelo fornecimento no estado do Paraná, no período de junho de 2023 a junho de 2024, referente ao Grupo B, subgrupo B2 – rural, no valor de R\$ 0,36 por

KWh, no período intermediário com impostos (COPEL, 2024). Contudo a equação que determinou a receita de energia elétrica anual se deu pela Equação 16.

$$REE = CBE * TEE * DA \quad (\text{Eq. 16})$$

Sendo:

REE – receita de energia elétrica (R\$. ano⁻¹);

CBE – conversão de biogás a energia elétrica (kWh.d⁻¹);

TEE – tarifa de energia elétrica praticada pela concessionária (R\$. kWh⁻¹);

D – dias que contém um ano (365 dias).

4.7.2.2 Rendimento do biofertilizante

Para verificar o potencial rendimento do biofertilizante gerado na UPL da cooperativa, as concentrações dos nutrientes nitrogênio total, fósforo e potássio, obtidas no ensaio semicontínuo, foram extrapoladas para os respectivos cenários, e suas concentrações convertidas em sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio, fertilizantes comerciais (Tabela 11).

Tabela 11 Estimativa da quantidade dos macronutrientes NPK no biofertilizante gerado na cooperativa.

Cenários (Trat.)	Quant. de biofertilizante (kg.d ⁻¹)	N (g.Kg MS ⁻¹)	P (g.Kg MS ⁻¹)	K (g.Kg MS ⁻¹)	MS no biof. (%)	N biof. (kg.d ⁻¹)	P biof. (kg.d ⁻¹)	K biof. (kg.d ⁻¹)
T ₀	120.432,00	27,62	32,12	3,82	0,24	8,10	9,42	1,12
T ₁	152.327,24	35,23	15,30	4,83	0,67	35,94	15,60	4,93
T ₂	149.619,65	31,05	18,74	4,77	0,62	28,71	17,32	4,41
T ₃	181.750,55	44,12	10,63	4,11	0,96	77,01	18,56	7,18
T ₄	174.169,55	39,19	10,01	5,32	0,77	52,29	13,35	7,09

Fonte: A autora (2024).

Para a determinação dos nutrientes no biofertilizante, seguiu a Equação 17, sendo essa aplicada individualmente para cada nutriente, e após convertidos as quantidades de gramas para quilos por dia.

$$Nut. \text{ biof.} = Quant. \text{ biof.} * Nut. \text{ semic.} * MS \text{ biof.} \quad (\text{Eq. 17})$$

Sendo:

Nut. Biof – quantidade de nutrientes no biofertilizante (kg.d⁻¹);

Quant. Biof. – quantidade de biofertilizante (volume) produzido diariamente (kg.d⁻¹);

Nut. semic. – concentração de nutrientes (NPK) presentes no semicontínuo (g.kg MS⁻¹);

MS Biof. – teor de matéria seca no biofertilizante (%).

Para realização da equivalência do NPK presente no biofertilizante aos fertilizantes comerciais, foi aplicada uma fórmula de conversão para cada um dos três nutrientes de interesse, conforme segue nas Equações 18, 19 e 20.

Equivalência do Nitrogênio do biofertilizante à Sulfato de Amônio comercial:

$$SA = \left[\frac{N \text{ biof.}}{0,2} \right] \times \left[\frac{365}{1000} \right] \quad (\text{Eq. 18})$$

Equivalência do Fósforo do biofertilizante à Supersimples comercial:

$$SS = \left[\frac{P \text{ biof.} \times 2,29}{0,18} \right] \times \left[\frac{365}{1000} \right] \quad (\text{Eq. 19})$$

Equivalência do Potássio do biofertilizante à Cloreto de Potássio comercial:

$$KCl = \left[\frac{K \text{ biof.} \times 1,2}{0,6} \right] \times \left[\frac{365}{1000} \right] \quad (\text{Eq. 20})$$

Sendo:

SA – quantidade de sulfato de amônio (Ton. a⁻¹);

N biof. – quantidade de nitrogênio presente no biofertilizante (kg.d⁻¹);

0,2 – fator de conversão do nitrogênio pelo teor presente no SA (adimensionais);

SS – quantidade de supersimples (Ton. a⁻¹);

P biof. – quantidade de fósforo presente no biofertilizante (kg.d⁻¹);

2,29 e 0,18 – fatores de conversão do fósforo (adimensionais);

KCl – quantidade de cloreto de potássio (Ton. a⁻¹);

K – quantidade de potássio presente no biofertilizante (kg.d⁻¹);

1,2 e 0,6 – fatores de conversão do potássio (adimensionais);

365 – quantidade de dias que compõe um ano;

1000 – valor para conversão da unidade de medida quilos para toneladas.

A possibilidade de aplicação do biofertilizante para adubação das culturas energéticas em substituição aos fertilizantes comerciais em cada cenário, dispensaria investimentos para a aquisição desses insumos, gerando receitas a cooperativa.

Assim, os nutrientes presentes nos biofertilizantes foram valorados considerando o custo comercial de cada um dos nutrientes, em levantamento realizado em 2 lojas agropecuárias de referência em venda de fertilizantes no estado do Paraná, no mês de junho de 2024, com valor médio de R\$ 1.882,50 t⁻¹ (±67,18) do sulfato de amônio, R\$ 2.125,00 t⁻¹ (±176,78) do supersimples e R\$ 2.573 t⁻¹ (±65,76) do cloreto de potássio.

Para tanto as receitas desses nutrientes foram realizadas pelo produto entre o seu valor comercial (R\$ t⁻¹) e a quantidade de nutrientes presentes nos biofertilizantes (t ano⁻¹), conforme segue os resultados individuais por nutrientes e o somatório dessas com as Receitas Totais, na Tabela 12.

Tabela 12 Receitas estimadas ao NPK presentes nos biofertilizantes, pela equivalência com os fertilizantes comerciais Sulfato de Amônio, Supersimples e Cloreto de potássio.

Cenários (Trat.)	Receitas com o Sulfato de Amônio (R\$ ano ⁻¹)	Receitas com o Supersimples (R\$ ano ⁻¹)	Receitas com o Potássio (R\$ ano ⁻¹)	Receitas totais com os Biofertilizantes (R\$ ano ⁻¹)
T ₀	27.829,18	92.943,95	2.102,45	122.875,58
T ₁	123.461,58	153.948,82	9.264,58	286.674,98
T ₂	98.620,49	170.888,89	8.277,05	277.786,43
T ₃	264.589,81	183.113,46	13.481,31	461.184,57
T ₄	179.656,04	131.781,99	13.326,93	324.764,96

Fonte: A autora (2024).

4.7.3 Despesas

4.7.3.1 Custos de produção das culturas energéticas

Os custos das produções das CE, necessária ao abastecimento dos biodigestores anualmente, foram calculados com base nas quantidades em MN utilizada nas cargas de abastecimento, na produtividade das variedades de abóboras paulista seca (T1 e T2), de 13,40 t ano⁻¹ (Gomes, 2017), e moranga (T3 e T4), de 20,65 t ha⁻¹ (Resende *et al*; 1996), na área necessária para produzir o quantitativo anual e

nos custos de produção por hectare de R\$1.262,10 (Rambo *et al.*, 2019), conforme segue na Tabela 13.

Tabela 13 Custos de produção das variedades de abóboras.

Trat / cenários	Quant. Abóbora MN (kg)	Produtividade da abóbora (t ha ⁻¹)	Área para produção de abóbora (ha ano ⁻¹)	Custo da produção de abóboras por área (R\$ ha ⁻¹)	Custo anual para produção de abóboras (R\$ ano ⁻¹)
T ₀	0,0	0,00	0,00	0	0,00
T ₁	31.895,2	13,40	868,79	1.262,10	1.096.497,60
T ₂	29.187,6	13,40	795,04	1.262,10	1.003.415,79
T ₃	61.318,6	20,65	1.083,84	1.262,10	1.367.913,02
T ₄	53.737,5	20,65	949,84	1.262,10	1.198.793,64

Fonte: A autora (2024).

A área para produção de abóbora foi calculada por meio da Equação 21:

$$APA = \frac{\left(\frac{Quant. CE MN}{1000}\right)}{PA} * 365 \quad (Eq. 21)$$

Sendo:

APA – área para produção de abóboras (ha ano⁻¹);

Quant. CE MN – quantidade de cultura energética em matéria natural (kg);

1000 – conversão de quilos (kg) para toneladas (t);

PA – produtividade de abóbora (t ha⁻¹);

365 – quantidade de dias que contém um ano.

O custo anual para a produção das abóboras foi estabelecido pela Equação 22:

$$CAPA = APA * CPAA \quad (Eq. 22)$$

Sendo:

CAPA – custo anual para a produção de abóboras (R\$ ano⁻¹);

APA – área para produção de abóboras (ha ano⁻¹);

CPAA - custo da produção de abóboras por área (R\$ ha⁻¹).

4.7.3.2 Custos com tratamento térmico das culturas energéticas

Em dois cenários, T2 e T4, foi previsto o tratamento térmico das abóboras, a 70°C. A cocção implica em custos relacionados à energia térmica necessária para a cocção e, portanto, seguem os levantamentos na Tabela 15.

Em laboratório, a partir da cocção a 70°C de determinada quantidade de abóboras, determinou-se que um quilo de GLP foi possível cozinhar $98,33 \pm 3,04$ kg de abóbora paulista e $99,81 \pm 0,82$ kg abóbora moranga.

Tabela 14 Levantamento dos custos para a cocção das abóboras nos cenários T₂ e T₄.

Trat / cenários	Quantidade abóbora cozida com 1 kg de GLP (kg CE. Kg GLP ⁻¹)	Quantidade abóbora a ser cozida (kg.a ⁻¹)	Quantidade de GLP para cocção das abóboras (kg ano ⁻¹)	Biogás usado na cocção de abóbora (m ³ ano ⁻¹)
T ₀	-	-	-	-
T ₁	-	-	-	-
T ₂	98,33	10.653.491,49	108.342,95	250.020,55
T ₃	-	-	-	-
T ₄	99,81	19.614.205,43	196.508,70	453.483,09

Fonte: A autora (2024).

Conquanto, com a quantidade de abóbora nos cenários T2 e T4, necessárias ao abastecimento diário dos biodigestores, dividido pela quantidade possível de cocção com um quilo de GLP, estimou-se a quantidade de gás para a cocção das abóboras anualmente.

Para tanto, no intuito de realizar o aproveitamento energético do biogás gerado na DA, realizou-se a conversão do rendimento energético do GLP à biogás, sabendo que 13 kg de GLP equivalem a 598 MJ (46 MJ.Kg GLP⁻¹), e que 1 m³ de biogás, com composição em torno de 60% de metano, equivale a 20 MJ.m³⁻¹, chegou-se a razão de que 13 kg de GLP equivalem a aproximadamente 30 m³ de biogás (Dalpaz, 2019).

Dessa forma, para estimar o volume de biogás necessário a cocção da quantidade de abóbora ao abastecimento do reator anualmente, foi realizado o seguinte cálculo, conforme segue demonstrado na Equação 23

(Eq. 23)

$$\text{Quant. de biogás} = \text{Quant GLP CA} / 13 * 30$$

Sendo:

Quant de biogás – quantidade de biogás necessário a cocção das abóboras (m³.a⁻¹);

Quant GLP CA – quantidade de GLP para cocção das abóboras (Kg.a^{-1});

13 – quilos de GLP (kg);

30 – quantidade de biogás para equivalência a 13 quilos de GLP (m^3).

4.7.3.3 Custos de Investimentos com os biodigestores e conjuntos motogeradores

De posse das características dimensionais para os diferentes cenários (Tabela 14), foram estimados, junto à empresa especializada, os custos referentes aos investimentos do biodigestor e lagoa para o biofertilizante, com a manta para revestimento, cobertura, sistema de fixação, entre outros, motogeradores de acordo com a potência e quantidade de unidades necessárias para cada sistema em escala real, utilizados para a conversão da energia calorífica do biogás em energia elétrica, assim como os respectivos painéis de força, bem como os custos de material civil, mão-de-obra de escavação e instalação (Tabela 15).

Tabela 15 Custos referentes aos investimentos à implantação dos biodigestores e conjunto motogerador.

Trat / cenários	Valor do Biodigestor de 5000 m^3 (R\$)	Valor da obra civil (R\$)	Valor dos motogeradores (R\$)*	Valor de uma lagoa de 2500 m^3 (R\$)	Valor do sistema de Tratamento do Biogás (R\$)
T ₀	500.000,00	200.000,00	339.200	60.000,00	120.000,00
T ₁	500.000,00	200.000,00	383.500	60.000,00	120.000,00
T ₂	500.000,00	200.000,00	383.500	60.000,00	120.000,00
T ₃	500.000,00	200.000,00	866.200	60.000,00	120.000,00
T ₄	500.000,00	200.000,00	657.000	60.000,00	120.000,00

* No T₀, foi adotado de um motogerador de 94 kV (75 kW) com eficiência de 35%. No T₁ e T₂, um motogerador de 165 kV (132 kW) com eficiência de 55%, para cada cenário e, duas unidades para o T₄. No T₃, foram adotados 2 motogeradores de 165 kW e 1 de 94 kW. Nos valores dos motogeradores estão incluídos os custos dos painéis elétricos.

Fonte: A autora (2024).

Os investimentos iniciais em cada cenário totalizaram R\$1.219.200,00 no T₀, R\$ 1.263.500,00 T₁ e T₂, R\$1.746.200,00 no T₃ e de R\$1.537.000,00 no T₄. Além disso, a cada cinco anos de uso, a cúpula de acúmulo do biogás requer substituição, consistindo um investimento de mais R\$220.000,00, no 5º e no 10º ano do projeto.

Os motogeradores utilizados foram: 1 de 94kVA (75kW) no T₀; 1 de 165kVA (132kW) no T₁ e T₂, e 2 unidades desse no T₄. No T₃ foram necessários 3 motogeradores, sendo 2 de 165kVA e 1 de 94kVA.

Com base no rendimento médio de biogás em cada biodigestor (Tabela 10), e na razão entre a conversão média de biogás, se obteve o tempo de funcionamento de um biodigestor por dia, em horas, de 15,45, 22,16, 20,05, 21,18 e 20,89, para os respectivos cenários T_0 , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 . Considerando que um motogerador pode operar no máximo 24 horas por dia e, adotando uma média de 20 horas de operação diária, chegou-se nas quantidades de motogeradores necessárias à conversão do biogás em energia elétrica em cada cenário.

4.7.3.4 Custos de manutenção e operação dos biodigestores e motogeradores

O custo de manutenção do biodigestor foi em torno de 1% a.a. sobre o valor de investimento, referente as remoções do lodo acumulado e da crosta da superfície, objetivando manter TRH ideal e evitar curtos-circuitos no sistema, entre outros problemas operacionais, com valor de R\$760,00, por ano, para todos os cenários.

A manutenção do conjunto motogerador, foi calculada em função do tempo de operação, tendo como custo médio R\$0,15kWh⁻¹, sendo que a cada 30.000 horas havia a necessidade de manutenção e retífica.

Além disso, a cada 10.000 horas de funcionamento, houve a necessidade de trocas de óleo, filtros de ar, velas, cabos, entre outros, conforme estabelecido pelo fabricante. Como o tempo de funcionamento dos motogeradores, por dia, variaram em cada cenário, o tempo necessário para a realização das manutenções também variaram, sendo que o custo médio anual resultou nos valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 Estimativa de custos com manutenções e retíficas do motogerador e sistema de purificação do biogás, considerando o tempo necessário de 10.000 e 30.000 horas, respectivamente, com custo de R\$ 0,14 kWh⁻¹ (manutenção) e R\$ 0,01 kWh⁻¹ (retífica).

Trat. / Cenários	Tempo funcion. motog. (h.dia ⁻¹)	Quantidade de Motogerador (un.) e potência	Tempo de retífica (anos)	Custo total de manut. (R\$ ano ⁻¹)	Custo total de retífica (R\$ ano ⁻¹)	Custo total da manut. e retífica (R\$ ano ⁻¹)
T_0	15,45	1 – 94 kVA (75 KWh)	5,32	58.390,72	4.170,77	62.561,49
T_1	22,16	1 – 165 kVA (132 KWh)	3,71	147.455,05	10.532,50	157.987,56
T_2	20,05	1 – 165 kVA (132 KWh)	4,10	133.377,41	9.526,96	142.904,37
T_3	21,18	2 – 165 kVA (132 KWh)	3,88	361.917,59	25.851,26	387.768,85
T_4	20,89	1 – 94 kVA (75 KWh) 2 – 165 kVA (132 KWh)	3,94	277.910,63	19.850,76	297.761,39

Fonte: A autora (2024).

Para a operação, foi considerado um funcionário rural, com salário mensal de R\$1.856,94, referente ao valor no estado do Paraná (2024), acrescido de FGTS e férias, contratado para operar diariamente o motor e promover a limpeza e a conservação das instalações do grupo gerador, com salário total anual de R\$ 22.283,28. Os equipamentos de proteção individual (EPIs) de uso desse funcionário, ao longo do ano, foram cotados a R\$1.172,16.

4.7.3.5 Custos de depreciação

A depreciação dos equipamentos e das instalações elétricas foi de 10%a.a., considerando a vida útil de 10 anos, conforme estabelecido na Instrução Normativa RFB nº1700, de 14 de março de 2017 (Receita Federal do Brasil, 2017). Assim, a depreciação anual sobre motogeradores e painéis elétricos e sistemas de tratamento de biogás foi de R\$4.592,00 no T₀, R\$5.035,00 no T₁, e T₂, de R\$9.862,00 no T₃ e de R\$7.770,00 no T₄.

Como em cinco anos a geomembrana utilizada na cúpula de acúmulo de biogás deve ser substituída e com valor residual zero, a depreciação anual foi de R\$44.000,00 em todos os cenários.

4. 7.4 Indicadores econômicos

Para o investimento em um projeto, as tomadas de decisões devem ser pautadas em alguns princípios, como a racionalidade, ou seja, as decisões pautadas em dados precisos e de forma objetiva. Assim, devem ser evitadas influências emocionais e liquidez, ou seja, objetivar rapidez para que um investimento dê retorno, sem que haja alguma perda significativa.

É necessário considerar, nesse sentido, que quanto maior o tempo, maiores são os riscos. O tempo é a relação com a natureza do projeto, podendo esse durar poucos meses ou anos. Quanto maior o tempo, maiores são as chances de *superávit*. Contudo, também são maiores os riscos inerentes e as incertezas associadas ao retorno esperado do investimento, podendo ser de natureza financeira, operacional, de mercado, legais, entre outras.

Dessa forma, apoiar-se apenas na ferramenta financeira de FCL para afirmar sobre a rentabilidade de um negócio é uma atitude arriscada. Assim sendo, o

levantamento do custo do biodigestor, as receitas potenciais da geração de energia e biofertilizante, as despesas de investimento e os custos operacionais por um horizonte de 10 anos foram organizados em planilhas de fluxo de caixa por cenário, aplicando o modelo de análise de viabilidade de projeto de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) para a atualização dos valores que foram recebidos a longo prazo (Equação 24).

$$FCD_j = \sum_{j=1}^n \frac{FCL}{(1+i)^n} \quad (\text{Eq. 24})$$

Dado que:

FCD_j - fluxo de caixa descontado;

FCL - fluxo de caixa livre do projeto;

i - taxa mínima de atratividade;

n - período de vida do ativo.

Como aporte, foram empregadas ferramentas financeiras de tempo de retorno de investimento – *Payback* descontado (Equação 25); Valor Presente Líquido –VPL (Equação 26); TIRaxa Interna de Retorno – TIR (Equação 27); e Índice de Lucratividade – L (Equação 28). A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) do projeto consistiu na Taxa do Sistema Especial de Liquidação de Custódia (SELIC), vigente no período da análise, sendo essa de 10,5%.

$$\text{Payback descontado} = (FC_0) + \frac{FCD}{(1 + TMA^t)} \quad (\text{Eq. 25})$$

Em que:

Payback descontado – tempo de retorno do investimento;

FC₀ – investimento processado no período zero, em valor negativo;

FCD – fluxo de caixa descontado;

TMA – taxa de juro em número decimal;

t – período de vida do ativo.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FCL_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (\text{Eq. 26})$$

Em que:

VPL - valor presente líquido;

FCL_t - fluxo de caixa de cada período;

i - taxa mínima de atratividade;

t - período de vida do ativo;

FC_0 - investimento processado no período zero.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FCL_t}{(1 + TIR)^t} - FC_0 \quad (\text{Eq. 27})$$

Em que:

0 - início do projeto;

FCL_t - fluxos de caixa de cada período;

t - período de vida do ativo;

TIR - taxa interna de retorno;

FC_0 - investimento processado.

$$IL = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FCL_t}{(1 + i)^t}}{I} \quad (\text{Eq. 28})$$

Sendo que:

IL - índice de Lucratividade;

FCL - fluxo de caixas;

t - período de vida do ativo;

I – investimento. .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO

O ensaio de PPM foi conduzido por 47 dias para todos os tratamentos, mas a estabilização da produção de biogás, com produção menor que 1% do volume acumulado, ocorreu em tempo menor: aos 13 dias no T₂ (CoDA ACo+ARS), aos 20 dias no T₃ (CoDA MCr+ARS), aos 22 dias no T₄ (CoDA MCo+ARS), aos 25 dias no T₁ (CoDA ACr+ARS) e aos 29 dias no T₀ (MonoDA ARS).

5.1.1 Volume acumulado e produção específica de biogás e metano

O volume acumulado de biogás, bem como os potenciais de produção de biogás e metano (L.kg SV⁻¹ e L.kg ST⁻¹) são apresentados na Tabela 17. Observa-se que a CoDA com abóbora moranga triturada crua (T₃) apresentou produção estatisticamente superior à MonoDA, com incremento de 78,77% no volume acumulado.

Para as produções específicas de biogás e metano (em L por kg SV), o T₃ foi estatisticamente superior aos demais tratamentos, enquanto para a produção específica de metano (em L por kg ST), T₃ e T₄ foram estatisticamente iguais (p<0.05).

Tabela 17 Produção de biogás e metano da MonoDA (T₀) e CoDA (T₁, T₂, T₃, T₄).

Trat.	Volume acum. Biogás (L)	Produção específica de Biogás (L kgSV ⁻¹)	Produção específica de Biogás (L kgST ⁻¹)	Produção específica de Metano (L kgSV ⁻¹)	Produção específica de Metano (L kgST ⁻¹)	Metano (%)*
T ₀	1,0 ^B ±0,3	746,0 ^B ±226,8	499,8 ^B ±152,0	554,8 ^B ±174,5	371,8 ^B ±119,9	74,2 ^A ±1,4
T ₁	1,2 ^{AB} ±0,2	740,0 ^B ±150,8	655,7 ^B ±133,7	473,8 ^B ±97,8	419,9 ^B ±86,7	64,0 ^{AB} ±1,5
T ₂	1,4 ^{AB} ±0,2	837,0 ^B ±117,3	743,3 ^B ±104,1	527,1 ^B ±78,8	468,1 ^B ±70,0	62,9 ^{BC} ±0,8
T ₃	1,8 ^A ±0,2	1389,9 ^A ±189,2	1205,7 ^A ±164,1	914,7 ^A ±122,1	793,5 ^A ±105,9	65,8 ^{AB} ±1,1
T ₄	1,2 ^{AB} ±0,1	939,1 ^B ±0,88,7	825,1 ^B ±78,0	611,3 ^{AB} ±52,4	537,1 ^B ±46,0	65,1 ^{AB} ±0,6

Trat.: tratamentos; T₀: MonoDA ARS; T₁: CoDA ARS + ACr; T₂: CoDA ARS + ACo; T₃: CoDA ARS + MCr; T₄: CoDA ARS + MCo; acum.: acumulado; letras diferentes = médias estatisticamente diferentes a 95% de significância.

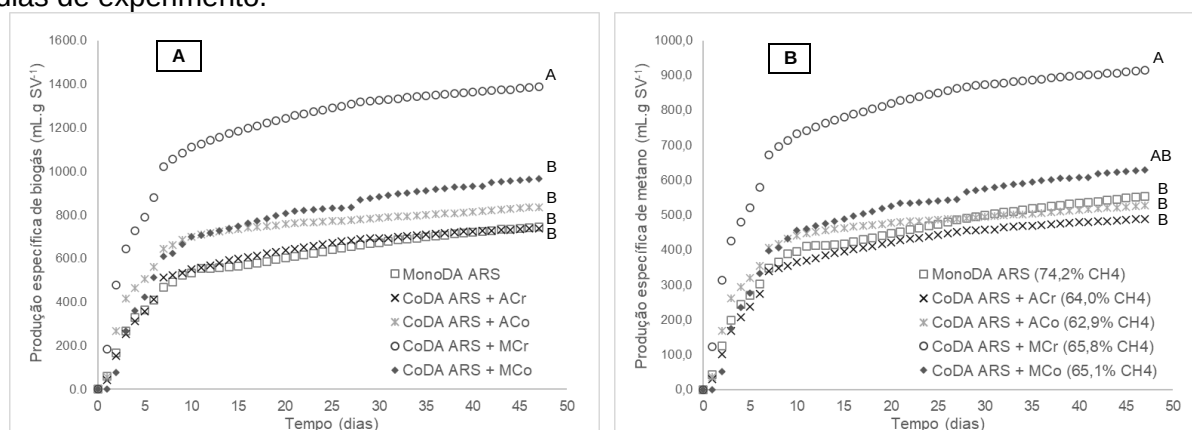
(*) Os dados de percentual de metano não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, mesmo após transformações. Assim, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Para os demais que apresentaram distribuição normal dos dados, foi aplicado o teste Tukey, de comparação múltiplas de médias.

Fonte: A autora (2024).

Os substratos utilizados no ensaio de PPM continham 66,8% de SV no T₀, 88,6% no T₁, 88,8% no T₂, 86,8% no T₃ e 87,9% no T₄. Teores acima de 60% de SV são propensos a alta biodegradabilidade e a eficiência da DA, visto que os SV estão diretamente relacionados a presença de matéria orgânica (Silva *et al.*, 2021), capaz de favorecer a conversão a biogás.

Na Figura 9, é possível observar a eficiência da DA a partir da produção específica de biogás (Figura 9a) e metano (Figura 9b), que variou de 740 a 1.389,9 L.kg SV⁻¹ e 473,8 a 914,7 L.kg SV⁻¹, respectivamente.

Figura 9 Produção específica de biogás (a) e metano (b), por mL.g SV⁻¹, no decorrer dos 47 dias de experimento.



Fonte: A autora (2024).

Portanto, houve o indicativo que os materiais orgânicos presentes nos substratos foram prontamente convertidos a biogás, com concentrações elevadas assim como Silva *et al.* (2021) observaram em seus estudos.

Isso demonstra que a moranga crua, apresentou efeitos sinérgicos à DA, tal qual Montoro *et al.* (2019) constataram em estudo com emprego de batata doce como CE em CoDA com esterco de gado leiteiro.

5.1.2 Rendimento de metano

As amostras de biogás compreenderam percentuais de CH₄ de 74,2% na MonoDA e 62,9-65,8% nas CoDAs. Para uma DA eficiente, relatos na literatura apontam que, em média, um biogás é composto por 50-75% de metano (Elalami *et al.*, 2019). Resultados de biogás obtidos por Sillero, Solera e Perez (2022) e Santos *et al.* (2022), revelaram composição de metano em torno de 60%, Vannarath e Talla

(2022) entre 71,53-75,06%, e González *et al.* (2022) apontaram valores entre 60-74%, que ratificam a eficiência da DA deste estudo.

Para tanto o T₀, T₁, T₃ e T₄ foram estatisticamente iguais, com concentração de metano no biogás de 64,0 a 74,2% de CH₄ (Tabela 18). E embora todos tratamentos tenham alcançado eficiência na DA, o T₂, contendo a variedade de abóbora paulista seca cozida como co-substrato, não potencializou a produção específica de CH₄ de maneira a superar a MonoDA.

Diversos parâmetros são intervenientes da produção de metano, como o pH, temperatura, relação C:N, tempo de retenção hidráulica, taxa de carga orgânica e AGV, que podem afetar o rendimento de metano em contraste a cinética da metanogênese (Elalami *et al.*, 2019).

Uma hipótese para que o T₂ tenha apresentado o menor rendimento de CH₄ dentre os tratamentos é a de que a variedade de Abóbora Paulista Seca, utilizada como co-substrato, tenha maior teor de açúcares comparada a moranga. Sendo possível, também, que ela contenha algum outro fator em sua composição que foi potencializado pelo pré-tratamento térmico, provocando perda de umidade e concentração de teores no processo de cocção.

Além disso, as *Cucurbitáceas* têm uma substância denominada *cucurbitacina*, que, dependendo da concentração, podem apresentar princípios tóxicos a animais e plantas, com atividades citotóxicas de danos ou destruição às células, a partir das alterações na permeabilidade da membrana, inibição enzimática ou morte celular, ainda com efeitos antifertilizante e pró-inflamatórias. Entretanto, estudos apontam propriedades farmacológicas aos derivados das *cucurbitacinas*, com características anti-inflamatória, fago-repelente, hepato protetora, curativa e antimicrobiana (Lang, 2012).

Em estudo com abóbora cabotiá, submetida a cocção em fogão, Paula *et al.* (2019) identificaram perda de 2,2% de umidade e incremento de concentração de 2,0% de carboidratos em relação a variedade crua. Logo, tais fatores podem ter contribuído para a concentração de *cucurbitacinas*, com efeitos nocivos à DA, em especial pelo efeito citotóxico.

Embora este estudo tenha sido montado consoante as diretrizes da VDI4630 (2006), tenha é possível que isso tenha proporcionado uma relação C:N inadequada, com disponibilidade do carbono e/ou nitrogênio em quantidade ou característica, cujos

intermediários culminaram no acúmulo de AGVs ou íons de amônio nos sistemas, conforme também observado por Damaceno *et al.* (2019b).

As culturas energéticas são fontes de carboidratos para DA e, comumente, são utilizadas em consórcios com substratos nitrogenados a fim de proporcionar uma suplementação de nutrientes e obter uma relação C:N em torno de 20 a 25 (Dupont *et al.*, 2020). Damaceno *et al.* (2019a) constataram, em seu estudo sobre CoDA com diferentes proporções no substrato, que os tratamentos com maiores teores de batata-doce tiveram tendências aos menores rendimentos de metano. Logo, os autores atribuíram isso a produção excessiva de ácidos orgânicos de cadeia curta, devido a rápida hidrólise dos açúcares.

Essa rápida hidrólise ocorre porque, termodinamicamente, os microrganismos têm maior predileção pelos carboidratos comparados as proteínas, devido a sua fermentação fornecer mais energia, visto que células bacterianas obtêm de 1–2mol de ATP.mol⁻¹ glicose em comparação a 0,5mol de ATP.mol⁻¹ aminoácidos. Ou seja, os açúcares têm potencial de fornecer cerca de 2 a 4 vezes mais energia. Assim, em alguns casos, ocorre, primeiramente, a metabolização completa dos carboidratos e, somente depois, inicia-se a conversão das proteínas (Deng *et al.*, 2023).

Portanto, considerando que os sistemas foram alimentados com substratos ricos em carboidratos e polissacarídeos, e supondo o acúmulo de ácidos graxos, é possível que a cinética de consumo da alcalinidade se tornou maior que a de produção, provocando a queda no pH, favorecendo, assim, a transformação dos íons carbonatos em CO₂ livre (Damaceno *et al.*, 2019). Embora ocorreu o incremento de biogás na CoDA no T₂, o rendimento de metano foi afetado.

Uma alternativa para melhor identificar essa situação seria a realização de análises com proporções distintas entre ARS e as variedades de abóboras a fim de se estabelecer percentuais mais favoráveis ao rendimento de CH₄, especialmente no T₂. Conquanto, apesar dos rendimentos de metano, os resultados das produções específicas de biogás e de metano se revelaram favoráveis ao T₃ da CoDA.

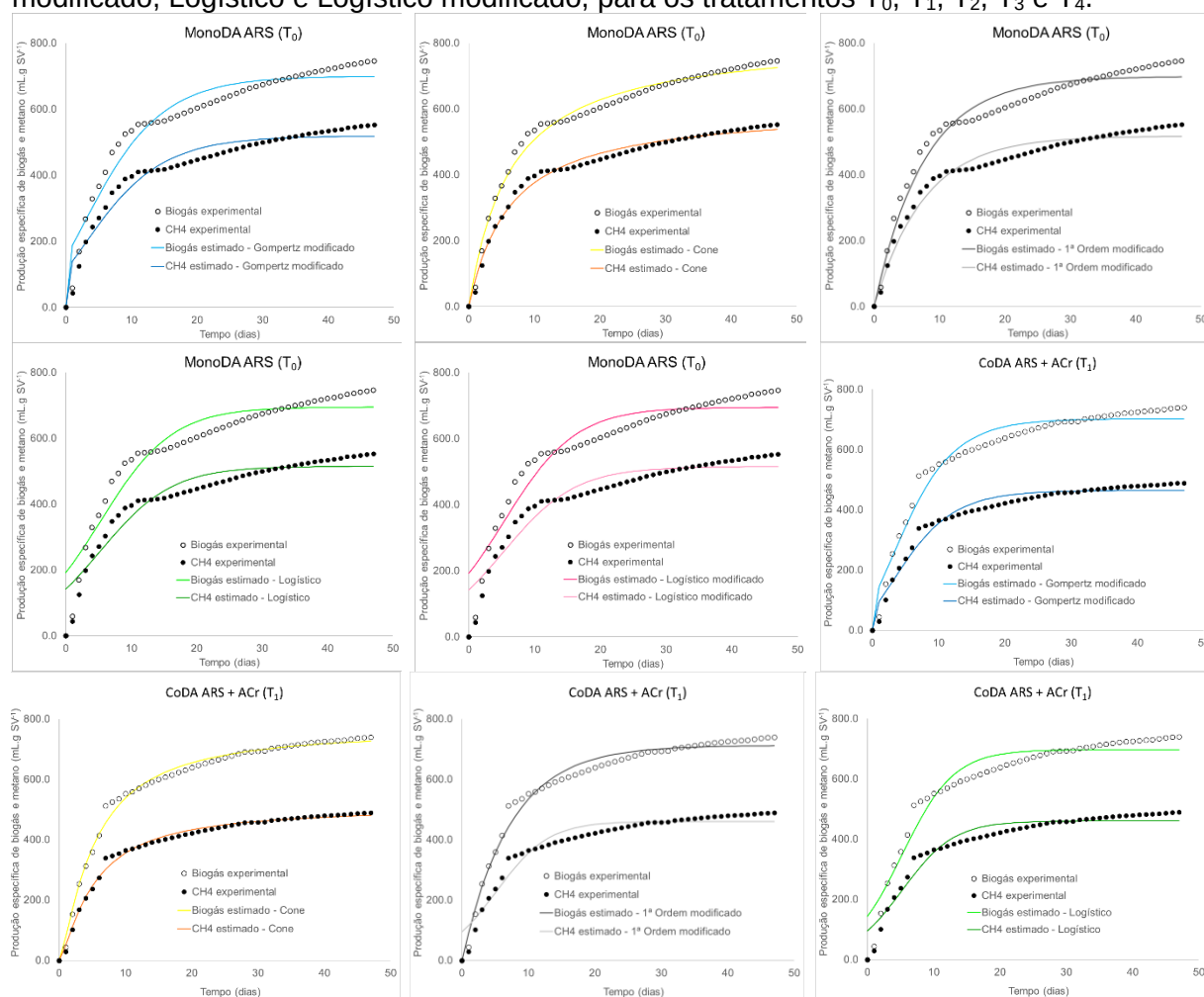
Ocorre que, o incremento do volume de biogás, no ensaio de PPM, forneceu condições proporcionais de superar a produção de biogás/metano que se conseguiria apenas com o tratamento em MonoDA. Assim, o T₃ da CoDA obteve 86,3% e 141,6% de produção de biogás a mais que o T₀, por SV e ST, bem como 64,9% e 113,4% a mais de produção de metano por SV e ST, respectivamente.

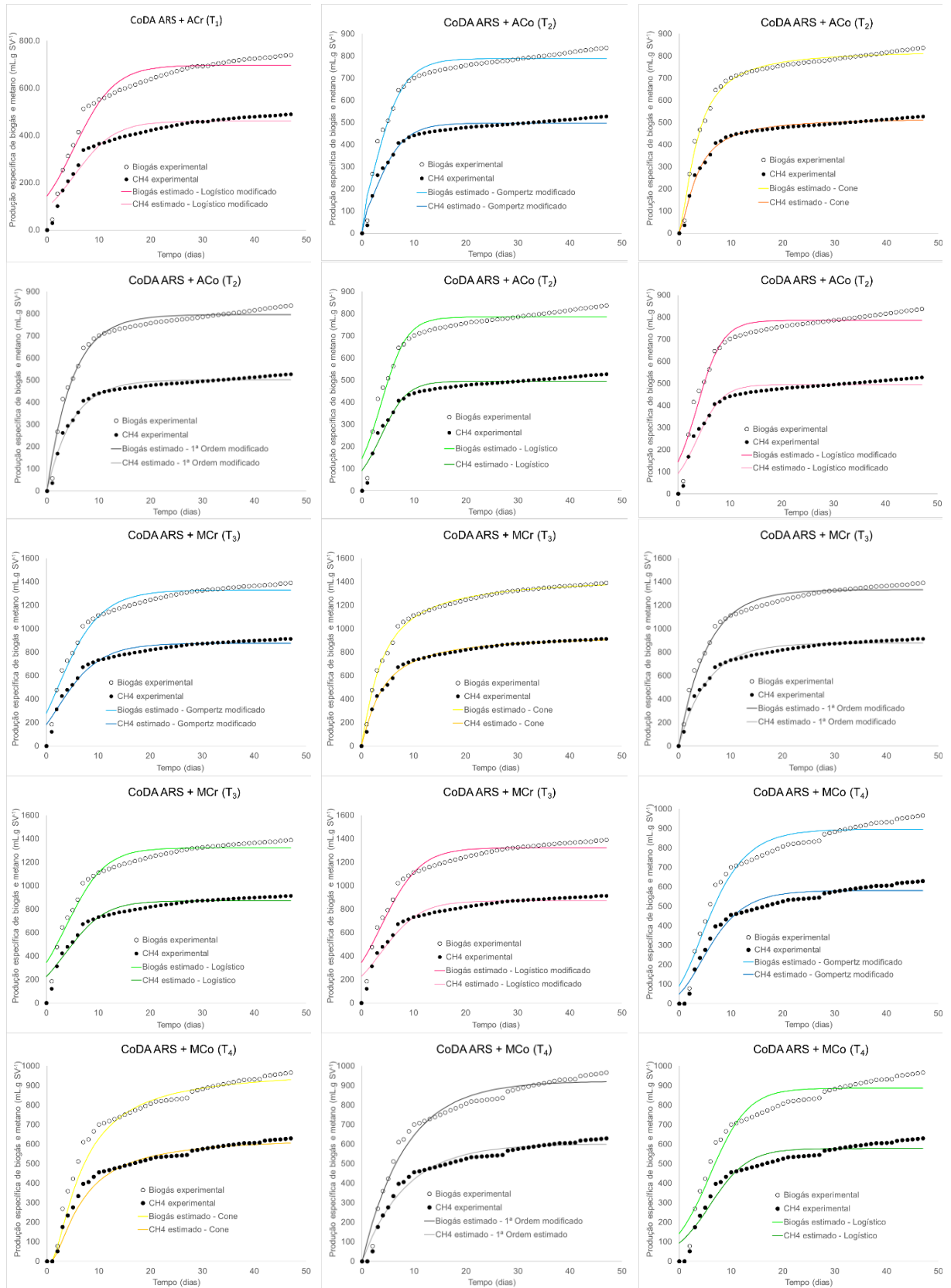
Em estudos similares utilizando CE, Damaceno *et al.* (2019a) e Montoro *et al.* (2019) alcançaram resultados vantajosos com a CoDA em relação a MonoDA, assim como este confirmou o potencial da abóbora moranga crua como cultura viável a recuperação energética, com possibilidade de alcançar rendimentos de metano ainda maiores ao desta pesquisa.

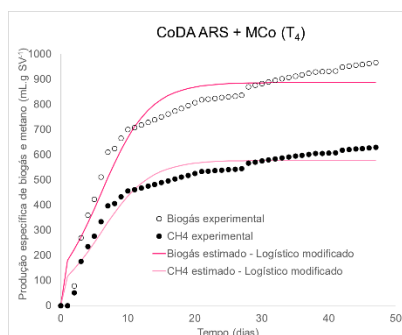
5.1.3 Análise Cinética

Para os resultados do ensaio de PPM, os modelos cinéticos de Gompertz modificado, Cone, Primeira Ordem modificado, Logístico e Logístico modificado descreveram adequadamente a produção acumulada de biogás, conforme a Figura 10.

Figura 10 Produção específica de biogás e metano ($\text{mL.g}^{-1} \text{SV}^{-1}$) no decorrer de 47 dias, referente o experimento e modelos de Gompertz modificado, Cone, Primeira Ordem modificado, Logístico e Logístico modificado, para os tratamentos T_0 , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 .







Fonte: A autora (2024).

Nota-se que entre os tratamentos ocorreu tendência similar de produção acumulada de biogás, experimental e prevista, com produção de biogás rápida nos primeiros dias, e após atingir a fase máxima, reduziu gradativamente até a estabilização, assim como observado por Meneses-Quelal *et al.* (2021) e Sillero, Solera; Perez (2022).

O fato de se tratar de um sistema de alimentação em batelada, com o passar dos dias culminou no esgotamento dos complexos biodegradáveis presentes no meio, e logo, na redução da atividade microbiana, desaceleração no processo de biodegradação e consequente redução da geração de biogás (Liew *et al.*, 2021).

Na Tabela 18, consta o resumo dos parâmetros e métricas, dos modelos cinéticos, para a avaliação dos ajustes.

Tabela 18 Parâmetros e métricas dos diferentes modelos cinéticos usados no ensaio de PPM.

Modelos	Parâmetros e métricas	Tratamentos				
		T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Gompertz Modificado	P (mL.g SV ⁻¹)	699,87±9,4	702,02±6,88	788,32±5,8	1330,05±10,18	895,62±10,9
	Rm (mL.gSVd ⁻¹)	38,09±3,2	50,93±3,5	90,54±6,5	104,18±6,7	67,12±5,5
	λ (d)	-3,92±0,9	-1,76±0,5	-0,81±0,4	-2,57±0,5	-0,82±0,6
	% dif. P	6,18	5,13	5,82	4,30	7,41
	p-valor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R ²	0,94	0,96	0,96	0,96	0,94
	R ² ajust	0,93	0,95	0,95	0,96	0,94
	RMSE	37,76	32,01	31,73	49,68	51,80
	P (mL.g SV ⁻¹)	816,65±20,9	767,67±8,9	825,97±6,0	1444,81±11,5	979,62±16,8
Cone	K (1 .d ⁻¹)	0,16±0,0	0,19±0,0	0,30±0,0	0,26±0,0	0,17±0,0
	N	1,02±0,0	1,31±0,1	1,49±0,1	1,18±0,0	1,43±0,1
	% dif. P	9,48	3,75	1,32	3,95	1,28

Primeira Ordem modificado	p-valor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R ²	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98
	R ² ajust	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98
	RMSE	19,19	14,96	16,85	19,65	29,64
	P (mL.g SV ⁻¹)	698,45±7,3	712,07±5,1	796,27±4,8	1332,15±8,0	922,72±9,7
	K (1 .d ⁻¹)	0,13±0,0	0,14±0,0	0,21±0,0	0,18±0,0	0,12±0,0
	% dif. P	6,37	3,77	4,87	4,15	4,60
	p-valor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R ²	0,96	0,98	0,97	0,97	0,97
	R ² ajust	0,95	0,98	0,97	0,97	0,97
Logístico	RMSE	31,67	22,94	25,33	40,54	39,69
	P (mL.g SV ⁻¹)	694,86±10,0	696,73±7,6	785,31±6,5	1322,99±11,3	886,80±12,0
	K (1 .d ⁻¹)	2,62±0,4	3,84±0,1	4,43±0,8	2,84±0,4	5,21±1,1
	B	0,18±0,0	0,26±0,0	0,41±0,0	0,27±0,0	0,28±0,0
	% dif. P	6,85	5,84	6,18	4,81	8,32
	p-valor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R ²	0,92	0,94	0,94	0,95	0,92
	R ² ajust	0,91	0,94	0,94	0,94	0,92
	RMSE	43,21	38,24	36,48	58,17	60,91
	P (mL.g SV ⁻¹ ad)	694,86±10,0	696,73±7,6	785,31±6,5	1322,99±11,3	886,80±12,0
Logístico Modificado	Rm (mL.gSVd ⁻¹)	31,74±3,1	44,72±3,9	79,80±7,1	89,15±7,0	61,23±6,3
	λ (d)	-5,68±1,3	-2,55±0,8	-1,26±0,5	-3,54±0,7	-1,27±0,9
	% dif. P	6,85	5,84	6,18	4,81	8,32
	p-valor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R ²	0,92	0,94	0,94	0,95	0,92
	R ² ajust	0,91	0,94	0,94	0,94	0,92
	RMSE	43,21	38,24	34,66	58,17	60,91

T₀: MonoDA ARS; T₁: CoDA ARS + ACr; T₂: CoDA ARS + ACo; T₃: CoDA ARS + MCr; T₄: CoDA ARS + MCo; P: produção acumulada de biogás; Rm: taxa máxima de produção de biogás; λ: fase lag, latência ou tempo mínimo para início da produção de biogás; K: constante de taxa cinética; n: fator de forma; b: constante; % dif. P: desvio da produção de biogás predita em relação a estimada; p-valor: análise de significância do modelo à α=0,05; R²: coeficiente de determinação de ajuste do modelo; R²: coeficiente de determinação ajustado, com desconto em relação a quantidade de variáveis de cada modelo; RMSE: raiz quadrada do erro médio.

Fonte: A autora (2024).

Em todos os modelos deste estudo, a diferença de rendimento de biogás (% diferença P), descrita entre a potencial produção acumulada experimental e estimada (mL.gSV⁻¹), resultou em percentuais menores que 9,5% na MonoDA e 8,3% na CoDA.

Relatos da literatura mencionam que, quanto menor o desvio, melhor é o ajuste, sendo que esse não pode ser maior que 10%, por sugerir a invalidação do modelo

(Khatun *et al.*, 2023). Logo, as diferenças de rendimento entre experimento e modelos deste estudo, indicaram bons ajustes, considerando que os desvios entre P estimado e experimental foram menores que 10%. Desvio similar foi encontrado por Vannarath; Talla (2022), sugerindo a utilização conjunta dessa com outras métricas dos modelos, para a adequada ratificação dos ajustes. Diferenças similares também foram observadas nos resultados encontrados por Meneses-Quelal *et al.* (2021) e Karki *et al.* (2022) e outrossim, retratadas como adequadas.

Para tanto, dois modelos se destacaram por apresentarem as menores diferenças de rendimento, sendo: Cone com 3,75% (T_1), 1,32% (T_2), 3,95% (T_3) e 1,28% (T_4) e Gompertz modificado com 6,18% (T_0) (Tabela 19). Estes resultados indicaram que o modelo de Cone sobressaiu preponderantemente na CoDA, enquanto Gompertz modificado na MonoDA. Resultados similares foram encontrados por Sillero, Solera; Perez (2022), ao obter diferenças de rendimento para o Gompertz modificado entre 2,48% e 2,52% em tratamentos contendo lodo de esgoto e resíduos agrícolas. Karki *et al.* (2022), em estudo cinético de MonoDA e CoDA com resíduos orgânicos, também obtiveram resultados de desvios similares aos desta pesquisa com o modelo de Cone, variando entre 1,7% e 10,9%, ratificando um ajuste adequado desses dois modelos, por esta métrica para DA de resíduos agroindustriais.

Neste estudo, as constantes cinéticas (K) ficaram na faixa de 0,16 a 0,30 d^{-1} com o modelo de Cone, e 0,12 a 0,21 d^{-1} no de Primeira Ordem modificado, com as maiores taxas no T_2 e as menores, no T_0 . As constantes cinéticas mais elevadas indicam maior velocidade das taxas de degradação (Khatun *et al.*, 2023), relacionado a biodegradabilidade, temperatura do teste e presença de substâncias inibidoras (Morais *et al.*, 2021).

Esses resultados, com valores na faixa de 0,1 a 0,2 d^{-1} confirmaram que a maior produção de biogás/metano ocorreu em tempo inferior a 30 dias, com a devida hidrólise dos compostos orgânicos degradáveis tal como abordado por Silva *et al.* (2021) e Karki *et al.* (2022).

No modelo logístico, o K variou entre 2,62 e 5,21 d^{-1} , com maior valor no T_4 , e novamente a menor no T_0 . Na representação sigmoidal dos modelos (Figura 10), o parâmetro K indicou a tendência de inclinação, denotando o início da produção de biogás/metano, quando a conversão de MO a biogás ocorre mais rapidamente. E quanto maior a constante cinética, maior a atividade hidrolítica (Karki *et al.*, 2022; Khatun *et al.*, 2023), o que reflete em demanda de um menor TRH, o que em escala

real é desejável, por possibilitar a redução das dimensões dos reatores para a mesma carga de abastecimento ou ainda, potencial de aumentar a carga, para o mesmo volume de reator (Silva *et al.*, 2021).

Os valores favoráveis do K, pode ser um indicativo que os materiais lignocelulósicos, presentes no substrato, encontravam-se na forma lábil e propícios a efeitos sinérgicos à produção de biogás a uma taxa mais rápida (Vannarath; Talla, 2022), o que possivelmente foi favorecido pelo pré-tratamento físico e térmico aplicado às CE, na medida adequada para alcançar tal condição. Zhou *et al.* (2018) retrataram a importância do pré-tratamento dos substratos orgânicos por favorecer as etapas limitantes do processo de DA, como a hidrólise e a acidogênese.

O pré-tratamento possibilita aumentar a geração de produtos químicos solúveis, podendo influenciar diretamente no rendimento de AGV. Cabe destacar, que em nenhum dos tratamentos se obteve $K < 0,1 \text{ d}^{-1}$, o que poderia caracterizar em maior tempo de adaptação dos microrganismos ao substrato, até atingir a aclimação, também associadas a acidificação inicial e potencial inibição da metanogênese, tal como Karki *et al.* (2022) identificaram em seu estudo.

A taxa máxima de produção de biogás (R_m) teve destaque no T_3 com os maiores valores nos modelos de Cone e Logístico modificado. No modelo de Cone, com R_m igual a 38,09 (T_0), 50,93 (T_1), 90,54 (T_2), 104,18 (T_3) e 67,12 (T_4) mL.g SV d^{-1} , a produção máxima dos tratamentos da CoDA superaram 1,3 a 2,7 vezes a MonoDA. No modelo Logístico modificado o R_m foi de 31,74 (T_0), 44,72 (T_1), 79,80 (T_2), 89,15 (T_3) e 61,23 (T_4) mL.g SV d^{-1} , e novamente a CoDA superou a MonoDA em 1,4 a 2,8 vezes. Pan *et al.* (2019) em estudos de lodo de esgoto com resíduos alimentares, também obtiveram maior R_m para a CoDA comparado a MonoDA, o que confirma a maior aptidão dos substratos da CoDA à atividade hidrolítica, em decorrência da melhor biodegradabilidade e taxa de conversão do co-substrato.

Nos modelos de Gompertz, modificado e logístico modificado, a fase *lag* é representada pela variável “ λ ”, que se refere ao tempo necessário para que os microrganismos metanogênicos se adaptem às condições anaeróbias, para iniciar a DA (Karki *et al.*, 2022; Vannarath; Talla, 2022). Neste estudo, a λ resultou em valores negativos de tempo (dias), o que segundo Morais *et al.* (2021) e Meneses-Quelal *et al.* (2021), representa ausência de fase *lag* no ensaio, e que a produção de biogás possivelmente ocorreu logo após a inoculação, reduzindo consideravelmente o tempo necessário para atingir a fase exponencial (Morais *et al.*, 2021).

Em ensaio de PPM, em média a fase *lag* varia de 0 a 18 dias (Vannarath e Talla, 2022), e portanto, em razão dos demais ajustes aos dados experimentais, tanto da perspectiva das métricas quanto dos aspectos visuais da curva sigmoidal de crescimento, entende-se que não houve fase *lag*, o que demonstra que os microrganismos presentes no inóculo estavam aclimatados e aptos a iniciar a produção de biogás, apontando novamente que os substratos apresentaram alta biodegradabilidade de compostos orgânicos (Meneses-Quelal *et al.*, 2021). No modelo de Cone, a fase *lag* é indicada pela constante ($n > 1$) (Morais *et al.*, 2021), e apresentaram resultados iguais a 1,0 (T_0), 1,2 (T_3), 1,3 (T_1), 1,4 (T_4) e 1,5 (T_2).

5.1.4 Avaliação dos modelos

O teste estatístico de *Fisher* na análise de variância (ANOVA), confirmou que todos os modelos aplicados apresentaram ajustes significativamente adequados aos dados, ao nível de confiança de 95% ($p\text{-valor} \leq 0,05$). Quanto ao coeficiente de determinação (R^2), os cinco modelos apresentaram R^2 acima de 0,9, que demonstram um ajuste aceitável. Entretanto, o valor que mais se aproximou do $R^2=1$ foi obtido no modelo cinético de Cone, com R^2 entre 0,98 e 0,99 em todos os tratamentos.

O coeficiente de determinação é uma métrica amplamente utilizada em validação de modelos de DA por explicar a proporção da variância na variável dependente, prevista a partir da variável independente do experimento (Egwu *et al.*, 2021). Para os modelos de Primeira Ordem e Gompertz modificado, Sillero, Solera; Perez (2022) encontraram $R^2 > 0,96$, tal qual observou-se neste estudo. Por outro lado, estudo realizado por Vannarath; Talla (2022), com DA por pré-tratamento de resíduos de noz-de-areca (lignocelulósico), encontrou-se $R > 0,99$ para modelo Gompertz modificado e Logístico modificado.

Os modelos podem diferir em quantidade de parâmetros, e isso influencia diretamente no R^2 . Para reduzir essa influência do número de parâmetros do modelo no R^2 , há, portanto, outra métrica amplamente utilizada, que é o R^2 ajustado (R^2_{ajust}), que consiste em descontar do R^2 , o número de variáveis que compõem a equação do modelo, reduzindo a influência da quantidade de variáveis que compõe a equação. Para o R^2_{ajust} obteve-se valores entre 0,98 e 0,99 em todos os modelos, e assim como observado por Karki *et al.* (2022), um dos melhores ajustes ocorreu com o modelo de Cone, sendo que o R^2_{ajust} sobressaiu nos tratamentos da CoDA frente aos da MonoDa.

O menor RMSE, para todos os tratamentos, novamente ocorreu no modelo cinético de Cone, com T₀: 19,19, T₁: 14,96, T₂: 16,85, T₃: 19,65 e T₄: 29,64 (Tabela 19). Quanto mais próximo de zero for o RMSE, revela que as previsões dos modelos foram mais precisas, pois os desvios em relação ao experimento são menores (Egwu *et al.*, 2021). Silva *et al.* (2021) mencionam que os modelos de Gompertz modificado, Primeira Ordem modificado e Logístico modificado apresentam versatilidade de aplicação à DA de diferentes resíduos.

Os modelos cinéticos resultam em informações como rendimento específico de metano, tempo da fase *lag* e parâmetros cinéticos, que permitiram avaliar o ajuste dos modelos, bem como proceder a otimização dos processos de DA (Karki *et al.*, 2022; Sillero, Solera; Perez, 2022). Entre os modelos cinéticos aplicados à MonoDA e CoDA neste estudo, pelas métricas de R², R²_{ajust} e RMSE, os melhores ajustes ocorreram, em ordem decrescente, nos modelos de Cone, Primeira Ordem, Gompertz Modificado, Logístico e Logístico modificado.

5.2 ENSAIO SEMICONTÍNUO

5.2.1 Produção específica de biogás e metano

O volume e as produções de biogás, assim como as produções e teores de metano, gerados no ensaio semicontínuo, seguem apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 Produção de biogás e metano no ensaio semicontínuo.

Trat.	Volume (L d ⁻¹)*	Produção específica de Biogás (L kgST ⁻¹)*	Produção específica de Biogás (L kgSV ⁻¹)*	Produção específica de Metano (L kgST ⁻¹)*	Produção específica de Metano (L kgSV ⁻¹)*	% Metano*
T ₀	8,8 ^C ±0,8	561,2 ^B ±53,3	839,4 ^B ±79,7	420,3 ^B ±39,9	628,7 ^A ±59,7	74,9 ^A ±1,3
T ₁	54,0 ^B ±3,5	529,3 ^B ±34,5	617,0 ^C ±40,3	321,3 ^C ±21,0	374,5 ^C ±24,4	60,7 ^A ±2,2
T ₂	47,8 ^B ±3,7	503,6 ^B ±38,8	570,3 ^C ±43,9	306,2 ^C ±23,6	346,7 ^C ±26,7	60,8 ^A ±2,8
T ₃	82,3 ^A ±6,2	867,9 ^A ±65,7	1025,9 ^A ±77,6	532,9 ^A ±40,3	629,9 ^A ±47,7	61,4 ^A ±2,2
T ₄	64,1 ^A ±2,2	713,4 ^A ±24,1	859,5 ^B ±29,1	429,5 ^B ±14,5	517,4 ^B ±17,5	60,2 ^A ±1,2

Trat.: tratamentos; T₀: MonoDA ARS; T₁: CoDA ARS + ACr; T₂: CoDA ARS + ACo; T₃: CoDA ARS + MCr; T₄: CoDA ARS + MCo; C, V_i: coeficiente de variação; letras diferentes = médias estatisticamente diferentes a 95% de significância.

Trat.: tratamentos; T₀: MonoDA ARS; T₁: CoDA ARS + ACr; T₂: CoDA ARS + ACo; T₃: CoDA ARS + MCr; T₄: CoDA ARS + MCo; letras diferentes = médias estatisticamente diferentes a 95% de significância.

(*) Os dados não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, mesmo após transformações. Assim, foi aplicado a ANOVA não paramétrica e comparação de amostras pelo teste de Kruskal-Wallis.

Fonte: A autora (2024).

A CoDA de ARS + MCr (T_3) apresentou significativa produção de biogás ($1025,9^A \pm 77,6$ L kgSV⁻¹) e metano ($532,9^A \pm 40,3$ L kgST⁻¹), sobressaindo aos demais tratamentos. Em relação a MonoDA (T_0), o T_3 teve um incremento da produção específica de 22,2% de biogás e 26,8% de metano, em relação aos ST, respectivamente.

A produção de Biogás (L kgST⁻¹) no T_3 se equiparou ao T_4 , com vantagens em relação aos demais tratamentos, com produção que ultrapassou a 54,6% a produção do T_0 . Quanto ao volume de biogás, a CoDA foi maior que a MonoDA, com quantidades que superaram entre 5,4 (T_2) e 9,35 (T_3) vezes o T_0 . Os SV favoreceram a MonoDA quanto a produção de metano (L kgSV⁻¹), com equivalência ao T_3 .

O ensaio semicontínuo ratificou os resultados observados no experimento em batelada, apontando que a CoDA de ARS com moranga crua é uma alternativa técnica que potencializa a geração de biogás e metano.

5.2.2 Eficiência de remoção de material orgânico no ensaio semicontínuo

Os tratamentos da CoDA apresentaram remoção de ST acima de 79,6%, com a maior eficiência no T_1 ($91,7 \pm 0,0\%$), em contraposição ao T_0 ($69,1^C \pm 0,0$), que teve a menor remoção, com 69,1% (Tabela 20).

Embora o T_1 tenha apresentado a maior eficiência de remoção de ST, não foi igualmente correspondente a produção de biogás e metano, se enquadrando como um dos menores rendimentos. Ocorre que, durante a limpeza do reator, ao final do ensaio, constatou-se que parte do substrato havia sedimentado, em especial algumas partes mais recalcitrantes, como cascas e sementes. Assim, verificou-se que a deposição do substrato contribuiu para a remoção dos ST, o que implica dizer que, este resultado não necessariamente seja da conversão da matéria carbonácea a biogás apenas.

Uma alternativa para trabalhos futuros seria realizar um pré-tratamento para diminuir o tamanho das partículas das cascas e sementes, de forma que a densidade do material não seja superior a massa líquida e permaneça na coluna d'água, bem como seja capaz de quebrar a recalcitrância das fibras e os disponibilize ao ataque microbiano da DA.

Tabela 20 Eficiência de remoção (%) de material orgânico.

Trat.	ST _{inicial} (%)*	ST _{final} (%)*	ER ST (%)*	SV _{inicial} (%)*	SV _{final} (%)*	ER SV (%)*
T ₀	0,8 ^B ±0,0	0,2 ^C ±0,0	69,1 ^C ±0,0	0,5 ^B ±0,0	0,1 ^D ±0,0	85,6 ^C ±0,0
T ₁	5,1 ^A ±0,2	0,7 ^{BC} ±0,0	91,7 ^A ±0,0	4,4 ^A ±0,2	0,3 ^{BC} ±0,0	93,7 ^{AB} ±0,0
T ₂	4,8 ^A ±0,2	0,6 ^C ±0,0	87,7 ^{AB} ±0,0	4,3 ^A ±0,2	0,3 ^{CD} ±0,0	93,9 ^A ±0,0
T ₃	4,7 ^{AB} ±0,6	1,0 ^A ±0,1	79,6 ^{BC} ±0,0	4,0 ^{AB} ±0,6	0,5 ^A ±0,0	87,7 ^{BC} ±0,0
T ₄	4,4 ^{AB} ±0,6	0,8 ^{AB} ±0,0	82,5 ^{BC} ±0,0	3,7 ^{AB} ±0,6	0,4 ^{AB} ±0,0	90,1 ^{ABC} ±0,0
Trat,	COT _{inicial} (%)*	COT _{final} (%)*	ER COT (%)*	Carb. _{inicial} (%)*	Carb. _{final} (%)*	ER Carb, (%)*
T ₀	0,3 ^B ±0,0	0,0 ^D ±0,0	85,6 ^C ±0,0	0,1 ^{BC} ±0,0	0,0 ^{BC} ±0,0	71,5 ^C ±0,0
T ₁	2,4 ^A ±0,1	0,2 ^{BC} ±0,0	93,7 ^{AB} ±0,0	1,3 ^{AB} ±0,1	0,1 ^{AB} ±0,0	91,8 ^{ABC} ±0,0
T ₂	2,4 ^A ±0,1	0,1 ^{CD} ±0,0	93,9 ^A ±0,0	0,8 ^{AB} ±0,0	0,1 ^{BC} ±0,0	88,1 ^{BC} ±0,0
T ₃	2,2 ^{AB} ±0,3	0,3 ^A ±0,0	87,7 ^{BC} ±0,0	3,1 ^A ±0,2	0,2 ^A ±0,0	94,7 ^{AB} ±0,0
T ₄	2,0 ^{AB} ±0,3	0,2 ^{AB} ±0,0	90,1 ^{ABC} ±0,0	3,1 ^A ±0,2	0,2 ^A ±0,0	95,1 ^A ±0,0

ST_{inicial}: sólidos totais na entrada do reator; ST_{final}: sólidos totais na saída do reator; ER ST: eficiência de remoção de sólidos totais; SV_{inicial}: sólidos voláteis na entrada do reator; SV_{final}: sólidos voláteis na saída do reator; ER SV: eficiência de remoção de sólidos voláteis; COT_{inicial}: carbono orgânico total na entrada do reator; COT_{final}: carbono orgânico total na saída do reator; ER COT: eficiência de remoção de carbono orgânico total; Carb._{inicial}: Carboidrato na entrada do reator; CARB._{final}: Carboidrato na saída do reator; ER Carb.: eficiência de remoção de Carboidrato; T₀: MonoDA ARS; T₁: CoDA ARS + ACr; T₂: CoDA ARS + ACo; T₃: CoDA ARS + MCr; T₄: CoDA ARS + MCo; C,V,: coeficiente de variação; letras diferentes = médias estatisticamente diferentes a 95% de significância, pelo teste estatístico não paramétrico *Kruskal-Wallis* de comparação múltiplas de amostras.

(*) Os dados não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, mesmo após transformações. Foi aplicado o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis*.

Fonte: A autora (2024).

As maiores remoções de ST, SV e COT ocorreram no T₁ (91,7%, 93,7% e 93,7%) e T₂ (87,7%, 93,9% e 93,9), enquanto os menores percentuais foram no T₀ (69,1%, 85,6% e 85,6%), respectivamente. Entretanto, ambos tratamentos apresentaram percentuais de remoção acima do encontrado na literatura, em reatores de fluxo tubular em condições similares a deste estudo. Resende *et al.* (2015), em análise à DA de esterco bovino com carga de 5% de ST, obtiveram eficiência de remoção de 65% de ST e 68% de SV, com TRH de 60 dias, ou seja, a menor eficiência encontrada supera a literatura, denotando eficiência do processo com um TRH menor.

Vale destacar que, conforme a Tabela 4 (caracterização), os maiores teores de celulose e lignina na carga de abastecimento estavam presentes no T₃. A celulose é formada por polímeros lineares de unidade de glicose, característico por constituírem as fibras de maiores resistências nos vegetais, devido as ligações intramoleculares de hidrogênio, conferindo resistência à olerícola, enquanto a lignina é um polímero complexo, amorfo e não-carboidrato, que aumenta a durabilidade e a estabilidade

estrutural das células vegetais, atuando como barreira contra ataques de patógenos e degradação enzimática (Adnane *et al.*, 2024; Somerville *et al.*, 2024).

Assim, a presença de maior teor de ST no biofertilizante no T₃ e as menores eficiências de remoção de ST, SV e COT no T₃ equiparando estatisticamente ao T₀, podem estar associadas à resistência desses substratos a DA, o que foi atenuado no T₄, possivelmente pelo tratamento térmico conferido a moranga, que reduziu a recalcitrância por quebrar na lignina, o anel aromático que cobre a celulose e hemicelulose (Ram; Nikhil, 2022) e encolher a estrutura cristalina da celulose (Adnane *et al.*, 2024).

Ademais, a quebra das ligações de hidrogénio nos polímeros complexos com a cocção a 70°C, aumentou a área acessível para a ação microbiana e enzimática eficiente. Estudo realizado por Rosa *et al.* (2023), com hidrólise subcrítica em que se aplicaram elevadas pressões e temperaturas aos subprodutos da jabuticaba seguido de DA, associou a eficiência de remoção de 83,83% de ST, a quebra da celulose, hemicelulose e lignina à hidrolisado.

Os maiores percentuais de carboidratos na carga estavam no T₃ e T₄ (3,1% e 3,1%), enquanto o menor, 0,1%, foi observado no T₀, com a melhor eficiência de remoção no T₄. Um parâmetro que poderia explicar seria a relação C/N, porém em todos os tratamentos essa relação foi menor que a recomendada, entre 16 a 35 (Dupont *et al.*, 2020; Ram; Nikhil, 2022; Adnane *et al.*, 2024) e 14 a 20 na ARS, com valores de 10,3±0,3 no T₀, 10,6±0,2 no T₁, 11,0±0,1 no T₂, 11,6±0,3 no T₃ e 12,4±0,4 no T₄.

Apesar dos maiores teores de carboidratos no T₃ e T₄, percebe-se que a presença das fibras e/ou outros fatores proporcionaram uma estabilidade das reações na DA. Nas análises de açúcares específicos, não foram detectadas Glicose, Frutose e Arabinose em concentrações acima de 25mg.L⁻¹ nos biofertilizantes, o que evidencia o consumo total em relação as concentrações das cargas de abastecimentos da CoDA (Tabela 21).

Observou-se que em relação a Glicose e Frutose não houve diferença estatística entre os tratamentos. Os açúcares presentes na CoDA são provenientes da adição das variedades de abóboras como substrato, que podem ser encontrados nos vegetais na forma livre ou ainda compondo as fibras que estruturam a parede celular, na forma de celulose, hemicelulose e lignina.

Tabela 21 Açúcares específicos presentes na carga de abastecimento dos biodigestores.

Tratamento	Glicose (g L ⁻¹)*	Frutose (g L ⁻¹)*	Arabinose (g L ⁻¹)
T ₀	0,0 ^A ±0,0	0,0 ^A ±0,0	0,0 ^D ±0,0
T ₁	0,7 ^A ±0,0	2,0 ^A ±0,1	7,1 ^A ±0,1
T ₂	2,1 ^A ±0,0	2,9 ^A ±0,0	3,8 ^B ±0,0
T ₃	2,3 ^A ±0,0	2,7 ^A ±0,0	2,4 ^C ±0,0
T ₄	2,4 ^A ±0,0	2,5 ^A ±0,0	2,3 ^C ±0,0

(*) Os dados de glicose e frutose na entrada não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, mesmo após transformações, e assim, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Para arabinose foi aplicado o teste Tukey.

Fonte: A autora (2024).

O tratamento contendo abóbora paulista crua (T₁), na carga de abastecimento, apresentou a maior concentração de arabinose, comparado aos demais tratamentos, e esse tipo de açúcar é associado a presença de hemicelulose (Abdnane *et al.*, 2024; Somerville *et al.*, 2024).

Concentrações similares a de açúcares observadas neste estudo foram encontradas por Rosa *et al.* (2023), que trabalharam com resíduos de jabuticaba para geração de biofertilizante e biogás, com DA em duas fases. Os autores encontraram concentrações de 5,78, 3,63 e 1,82 g L⁻¹, de glicose, frutose e arabinose, respectivamente, a que associaram a presença desses à liberação na fase hidrólica devido a elevada temperatura e pressão aplicada, que tornou acessível à degradação lignocelulósica.

Além disso, estudos realizados por Fila *et al.* (2013) e Shajan *et al.* (2024), apontaram que as maiores frações de açúcares em abóboras estão presentes na casca, com valores médios de 49,11% de carboidratos. Posto que a abóbora paulista apresentou cerca de 20% de sua composição de casca (Tabela 4), percentual três vezes maior que a moranga, com 6,3%, as maiores concentrações de açúcares podem estar associadas aos tratamentos contendo abóbora paulista seca, T₁ e T₂.

A celulose e lignina foram maiores nos tratamentos contendo moranga (T₃ e T₄) comparados a abóbora paulista (T₁ e T₂). No entanto, a hemicelulose teve os maiores teores nos tratamentos contendo as abóboras cozidas, com 7,4% no T₄ e 6,7% no T₂.

5.2.3 pH, alcalinidade parcial, alcalinidade total, acidez volátil e relação AV/AT

Em todos os tratamentos, o biofertilizante apresentou pH > 8, com destaque ao T₂ que teve o pH mais básico, com 8,7, embora o substrato utilizado para abastecer

os biodigestores apresentavam pH entre 4,3 e 4,9 nas CoDA, confirmando que o meio reacional nesses sistemas proporcionou condições favoráveis ao equilíbrio das fases na DA, e como consequência potencializou a produção de biogás e metano (Cremonez *et al.*, 2019), conforme observado pelos parâmetros de pH, AP, AT, AV e relação AV/AT (Tabela 22).

Tabela 22 Valores de pH, alcalinidade, acidez volátil, relação AV/AT do ensaio semicontínuo.

Trat	pH	Alcalinidade parcial (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Alcalinidade total * (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	Acidez volátil (mg L ⁻¹)*	Relação AV/AT*
T ₀	8,4 ^{BC} ±0,1	2222,5 ^D ±72,9	2805,0 ^C ±108,9	301,2 ^C ±80,3	0,1 ^{BC} ±0,0
T ₁	8,4 ^{ABC} ±0,2	5615,0 ^A ±625,5	6425,0 ^A ±458,0	534,0 ^{ABC} ±57,8	0,1 ^{BC} ±0,0
T ₂	8,7 ^A ±0,1	4490,0 ^B ±194,5	5130,0 ^{AB} ±257,2	339,0 ^C ±41,1	0,1 ^C ±0,0
T ₃	8,2 ^C ±0,2	3510,0 ^C ±281,8	5220,0 ^{AB} ±364,7	1516,8 ^A ±63,9	0,3 ^A ±0,0
T ₄	8,6 ^{AB} ±0,3	3490,0 ^C ±200,3	4940,0 ^{BC} ±241,0	1074,0 ^{AB} ±76,7	0,2 ^{AB} ±0,0

(*) Os dados não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, mesmo após transformações, e assim, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Para análises de alcalinidade parcial e pH, que apresentaram distribuição normal dos dados, foi aplicado o teste Tukey, de comparação múltiplas de médias.

Fonte: A autora (2024).

As concentrações de CaCO₃ variaram entre 2.222,5 a 5.615 mg.L⁻¹ de alcalinidade parcial (AP) e de 2.805,0 a 6.425,0 mg.L⁻¹ de alcalinidade total (AT) no biofertilizante, com valores próximos ao recomendado como favorável à DA, de 1.000,00 a 5.000,00 mg CaCO₃ L⁻¹ (Rosa *et al.*, 2023), revelando que a adição das CE nos tratamentos da CoDA, potencializaram a formação de carbonatos e bicarbonatos em relação a MonoDA (T₀), sendo que esta capacidade tampão foi maior no T₁, excedendo ao recomendado.

No T₃, a abóbora moranga crua contribuiu com o maior teor de carboidrato (3,1%), se destacando como um dos maiores desempenhos na remoção desse, com 94,7±0,0% de eficiência, ficando atrás apenas do T₄, com 95,1A±0,0. Como consequência à concentração de carboidrato, o T₃ foi responsável também pelas maiores concentração de AGVs (1.516,8±63,9mg.L⁻¹ de AV), se enquadrando na faixa ótima à estabilidade da DA, que é de 3.000 mg.L⁻¹ de AV segundo Cremonez *et al.* (2019), e logo, apresentou a melhor relação AV/AT, de 0,3.

Muito embora a adição das variedades de abóboras pudesse ter favorecido o acúmulo de AGVs no sistema, principalmente porque este tratamento continha a maior concentração de arabinose, isso não aconteceu. A capacidade tampão no meio

reacional, forneceu condições proporcionais de neutralizar os ácidos. Assim, tais parâmetros intervenientes corroboraram para o maior rendimento de biogás e metano no T₃.

A relação AV/AT é um indicativo que demonstra a capacidade dos carbonatos e bicarbonatos formados no processo, em neutralizar os ácidos orgânicos gerados durante a DA (Cremonez *et al.*, 2019). Dessa forma, além da necessidade de remoção dos açúcares, é importante que os subprodutos dessa conversão, os ácidos de cadeia curta, também sejam consumidos, a fim de evitar o comprometimento da DA. Porém, para que a DA seja eficiente é preciso que o substrato apresente condições sinérgicas à hidrólise, acidogênese e acetogênese, na produção de carbonatos e bicarbonatos, propícios a equilíbrio dessas conversões na metanogênese.

Embora os tratamentos MonoDA e CoDA tenham apresentado relação AV/AT que indicam esta manutenção de equilíbrio das reações, os valores de 0,1 nos T₀, T₁, T₂ e 0,2 no T₄, foram indicativos que os biodigestores têm potencial a maior carga orgânica volumétrica.

5.2.4 Ácidos Graxos Voláteis

A formação dos ácidos graxos voláteis (AVGs), na DA é resultado da conversão dos açúcares a ácidos orgânicos e da degradação da biomassa lignocelulósica. Na Tabela 23, seguem as concentrações dos AGVs das cargas de abastecimento e dos biofertilizantes.

Na carga de abastecimento, as concentrações de ácido acético variaram entre $3 \pm 0,5$ a $6,8 \pm 0,4$ mgL⁻¹, mas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Esse foi o único ácido que após a DA foi detectado no biofertilizante, cujas concentrações mais elevadas ocorreram no T₃ e T₄, com 2,1 gL⁻¹ e 2,4 g.L⁻¹, respectivamente, e indicaram as menores reduções comparado aos demais tratamentos, o T₀ 87%, T₁ 85%, T₂ 91%, T₃ 13% e T₄ 20%.

Cabe salientar que o ácido acético (CH₃COOH) é um dos principais intermediários formados na fase acidogênica (Rosa *et al.*, 2023), e que convertido a hidrogênio molecular, pode ser transformado diretamente a metano e CO₂ (Cremonez *et al.*, 2019; Ram; Nikhil, 2022).

Tabela 23 Concentrações dos ácidos orgânicos acético, propiônico, láctico, butírico e fórmico na carga de abastecimento na entrada (E) e no biofertilizante na saída (S).

Trat.	Ácido Acético (g L ⁻¹)*		Ácido Propiônico (g L ⁻¹)		Ácido Láctico (g L ⁻¹)		Ácido Butírico (g L ⁻¹)		Ácido Fórmico (g L ⁻¹)	
	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
T ₀	4,6 ^A ±2,3	0,6 ^{BC} ±0,1	1,6 ^A ±0,2	Nd.	0,0 ^C ±0,0	Nd.	0,8 ^A ±0,1	Nd.	Nd.	Nd.
T ₁	5,5 ^A ±1,8	0,8 ^{AB} ±0,2	1,2 ^{AB} ±0,2	Nd.	6,1 ^A ±0,5	Nd.	0,7 ^{AB} ±0,1	Nd.	Nd.	Nd.
T ₂	6,8 ^A ±0,4	0,6 ^{AB} ±0,0	1,3 ^{AB} ±0,0	Nd.	3,2 ^B ±0,0	Nd.	0,5 ^C ±0,1	Nd.	Nd.	Nd.
T ₃	2,4 ^A ±0,7	2,1 ^A ±0,3	0,9 ^B ±0,0	Nd.	3,5 ^B ±0,1	Nd.	0,5 ^{BC} ±0,1	Nd.	Nd.	Nd.
T ₄	3,0 ^A ±0,5	2,4 ^A ±0,2	0,9 ^B ±0,2	Nd.	2,5 ^B ±0,5	Nd.	0,5 ^C ±0,1	Nd.	Nd.	Nd.

(*) Os dados do ácido acético na saída não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, mesmo após transformações, e assim, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Para as demais análises, que apresentaram distribuição normal dos dados, foi aplicado o teste Tukey, de comparação múltiplas de médias; E: carga de abastecimento na entrada; S: biofertilizante na saída. Nd.: não detectável.

Fonte: A autora (2024).

Os precursores dos ácidos são os carboidratos, que também se encontravam em concentrações mais elevadas nesses tratamentos (Tabela 21). Essas concentrações são compatíveis aos maiores teores de celulose e lignina no T₃ e T₄ (17,3±0,4 e 18,2±0,7) (Tabela 4), sugerindo que o ácido acético no biofertilizante tenha sido resultado das conversões dos açúcares provenientes da quebra das fibras.

Assim, a presença de fibras vegetais remete a recalcitrância do substrato (Adnane *et al.*, 2024; Somerville *et al.*, 2024), e logo, a glicose e os ácidos formados a partir dessa, foram disponibilizados de forma gradativa no meio reacional, à medida que a DA conseguia promover a quebra da celulose e da lignina.

Embora não tenha sido observada diferença estatística entre o T₃ e T₄, os maiores valores de celulose, lignina, carboidratos e ácido acético foram encontrados no tratamento em que a abobora moranga recebeu tratamento térmico (T₄) seguido da crua (T₃), sugerindo que a cocção tenha auxiliado na quebra das fibras, com maior disponibilização dos açúcares e acúmulo de ácidos, conforme pode ser observado na Figura 11 d).

Entretanto, em um cenário ótimo, o ácido acético no biofertilizante deveria ter sido totalmente convertido a biogás. Porém as concentrações encontradas na saída do biodigestor (0,6±0,0 a 2,4±0,3 g.L⁻¹) indicam que a DA ocorreu de forma ineficiente, o que pode estar associado à presença de amônia acima do limite adequado à DA, com efeito tóxico aos microrganismos metanogênicos acetoclásticos, responsáveis pela conversão de cerca de 70% dos produtos intermediários (Wilson *et al.*, 2012).

Em estudo com consórcios microbianos sob inibição de amônia na digestão anaeróbia, Li *et al.* (2024) constataram reduções na produção de metano a partir do estresse com amônia e aumento na concentração de acetado no meio. Dessa forma, o efeito tóxico das concentrações elevadas de amônia aliado ao pH mais alcalino, causaram a inibição do crescimento microbiano acetoclástico pela atividade enzimática, contribuindo para o crescimento de outros grupos, com a predominância de microrganismos metanogênicos hidrogenotróficos (Beraud-Martínez *et al.*, 2024), que em competição com os acetoclásticos, desencadearam o acúmulo de AGV no meio.

Para remoção completa do ácido acético, uma alternativa seria aumentar o TRH (Wilson *et al.*, 2012), o que favoreceria a predominância das conversões pela via metabólica hidrogenotrófica (Li *et al.*, 2024). Uma outra opção seria fornecer substratos lábeis como fonte de carbono de rápida hidrólise, proporcionando condições favoráveis aos microrganismos acetoclásticos a partir de uma relação C/N equilibrada, tal como sugere Wilson *et al.* (2012), em estudo de cinética da inibição da metanogênese por amônia.

As concentrações de ácido acético neste estudo, foram similares às encontradas por Rosa *et al.* (2023) com DA de subprodutos da jabuticaba, com média de $0,7 \text{ g.L}^{-1}$, alcançando $1,27 \text{ g.L}^{-1}$, em digestão com duas fases. As maiores concentrações de ácido propiônico ocorreram no T_0 , seguido do T_2 e T_1 , com 1,6, 1,3 e $1,2 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente, e com as menores concentrações no T_3 e T_4 , ambos com $0,9 \text{ mg.L}^{-1}$.

Comparado ao ácido acético, o propiônico apresenta um processo de degradação mais lento, pois antes é convertido a acético para depois compor o metano, além de que, termodinamicamente, requer uma pressão parcial do hidrogênio mais baixa no meio à conversão, desfavorecendo as velocidades das reações (Cremonez *et al.*, 2019; Ram; Nikhil, 2022). Outra característica desse ácido é que, condições de pH elevado com fermentação de culturas mistas, sua formação é favorecida (Castro *et al.*, 2024).

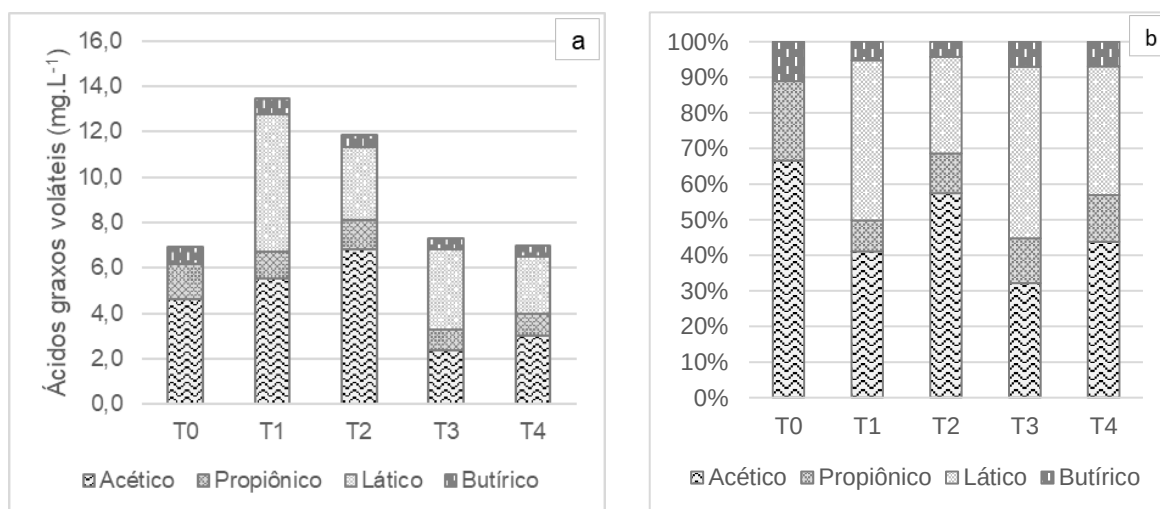
O ácido láctico é um precursor do ácido propiônico (Ram; Nikhil, 2022), e apresentou as maiores concentrações no T_0 e T_1 , portanto, sua presença na carga de abastecimento é um indicativo de sobrecarga no sistema. A presença do ácido butírico, bem como do propiônico, têm relação com a formação de biohidrogênio

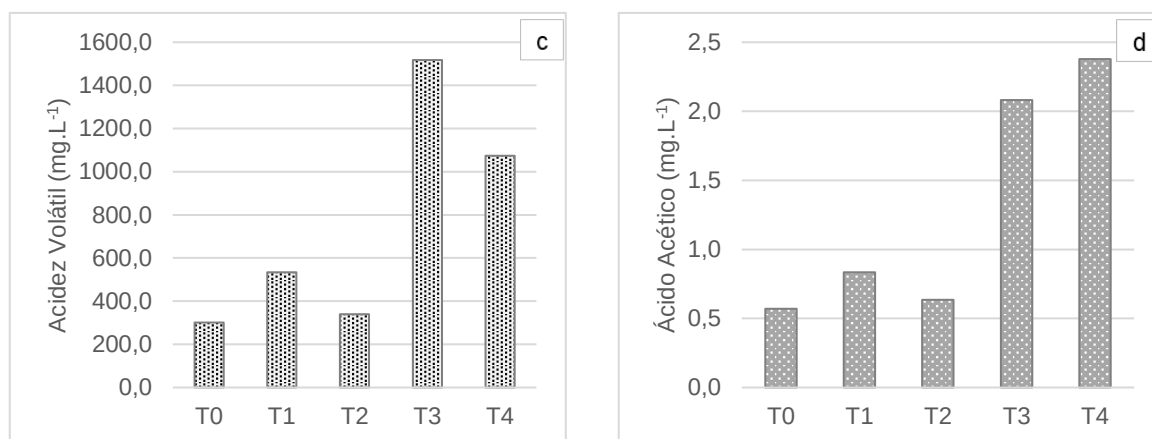
(Ram; Nikhil, 2022), e neste caso as concentrações foram maiores no T₀, seguida do T₁, T₃ com abóbora crua e as menores no T₂ e T₄, contendo abóbora cozida.

Assim, os tratamentos com maiores concentrações de ácido propiônico, lático e butírico propiciaram condições de processos de conversões a CO₂ e metano mais lentos comparado aos tratamentos com maior proeminência do ácido acético na carga. Apesar da presença de AGVs nas cargas de abastecimento, a conversão se mostrou eficiente ao passo que no biofertilizante não foram detectados os ácidos lático, propiônico, butírico e fórmico, em concentrações acima de 25mg.L⁻¹, e não houve detecção de ácido fórmico na carga de entrada.

Na Figura 11 a) e b) é possível observar as concentrações e os respectivos percentuais de AVGs na carga de abastecimento. Ainda a Figura 11 c) apresenta as concentrações de acidez volátil detectada no biofertilizante, enfatizando uma tendência dos AVs similar as concentrações de ácidos acético no biofertilizante d), o único ácido remanescente após o processo de DA.

Figura 11 a) Concentração de AGVs na carga de abastecimento do reator e b) percentual correspondente aos AGVs, c) acidez volátil no biofertilizante e d) ácido acético no biofertilizante.





Fonte: A autora (2024).

5.2.5 Valorização agrônômica do biofertilizante no ensaio semicontínuo

O potencial fertilizante do material digerido, denominado como biofertilizante, está relacionado com a concentração dos macronutrientes primários, N, P e K, macronutrientes secundários, Ca e Mg, e aos micronutrientes, Cu, Fe, Mn, Na e Zn, que quanto maiores as quantidades, maior o potencial de fertilização e interesse agrônômico (Cucina *et al.*, 2021).

A fim de potencializar essas características, a CoDA com as variedades de abóbora como CE surgiu como uma alternativa, por apresentar características nutricionais com potencial a complementar as da ARS, atuando de forma sinérgica na degradação da MO, no rendimento energético e recuperação nutricional. Assim como pressupunha, as concentrações de nutrientes nos biofertilizantes apresentaram potencial ao aproveitamento agrônômico, conforme dados da Tabela 24.

Os tratamentos da CoDA com as variedades de abóbora apresentaram concentrações de nitrogênio total (NTK) superiores a MonoDA com ARS, sendo que o T₃, com $44,1 \pm 1,2 \text{ gL}^{-1}$ foi o que apresentou a maior concentração desse nutriente. A remoção do COT, de carboidratos e a estabilidade do processo corroboram para a maior disponibilidade do NTK no T₃. Assim, a quantidade de NTK presente no biofertilizante é uma fonte de adubação que contribui para a renovação no solo a médio e longo prazo, obtido com maior potencial no T₃ (Cucina *et al.*, 2021).

Tabela 24 Concentração de macronutrientes primários e secundários e micronutrientes nos biofertilizantes de MonoDA de ARS (T₀) e CoDA de ARS com abóboras paulista (T₁ e T₂) e moranga (T₃ e T₄).

Trat.	NTK	P *		K *		N-amon *	
		g.Kg ST ⁻¹				g.L ⁻¹	
T ₀	27,6 ^E ±3,2	32,1 ^A ±5,0		3,8 ^C ±0,4		0,8 ^{BC} ±0,0	
T ₁	35,2 ^C ±1,5	15,3 ^{ABC} ±0,9		4,8 ^A ±0,4		1,7 ^A ±0,3	
T ₂	31,1 ^D ±1,6	18,7 ^{AB} ±2,3		4,8 ^{AB} ±0,4		1,1 ^{BC} ±0,0	
T ₃	44,1 ^A ±1,2	10,6 ^C ±1,7		4,1 ^{BC} ±0,3		1,1 ^{BC} ±0,1	
T ₄	39,2 ^B ±1,6	10,0 ^C ±1,5		5,3 ^{AB} ±1,4		1,2 ^{AB} ±0,1	
Trat.	Ca *	Mg *	Cu *	Fe *	Mn *	Na *	Zn *
	g.Kg ST ⁻¹						
T ₀	66,1 ^A ±3,3	21,6 ^A ±0,9	0,2 ^A ±0,1	0,7 ^A ±0,1	0,3 ^A ±0,0	49,3 ^A ±5,8	1,2 ^A ±0,3
T ₁	39,7 ^B ±3,1	9,0 ^B ±1,4	0,1 ^{AB} ±0,1	0,4 ^B ±0,0	0,1 ^B ±0,0	17,6 ^{AB} ±2,4	0,9 ^{AB} ±0,3
T ₂	39,6 ^B ±2,1	9,3 ^B ±0,9	0,0 ^{AB} ±0,0	0,4 ^B ±0,0	0,1 ^B ±0,0	16,6 ^{AB} ±3,4	0,7 ^B ±0,3
T ₃	41,7 ^B ±2,0	12,3 ^{AB} ±1,0	0,2 ^A ±0,1	0,6 ^A ±0,0	0,1 ^{AB} ±0,0	8,0 ^C ±1,2	1,0 ^{AB} ±0,5
T ₄	43,2 ^{AB} ±3,6	15,3 ^A ±4,9	0,0 ^B ±0,0	0,4 ^{AB} ±0,0	0,1 ^B ±0,0	12,1 ^{BC} ±1,1	1,2 ^{AB} ±0,5

(*) P, K, N-amon, Ca, Mg Cu, Fe, Mn, Na e Zn: Kruskal-Wallis.

Fonte: A autora (2024).

Nos tratamentos que as CE receberam tratamento térmico, T₂ e T₄, notou-se uma perda de NTK em torno de 11%, comparado aos T₁ e T₃, que continha as mesmas variedades de abóboras paulista e moranga, respectivamente, porém cruas. Assim o tratamento térmico aplicado às variedades de abóboras no T₂ e T₄ podem ser uma desvantagem do ponto de vista de recuperação do N, na perda de amônia ou íon amônio, por volatilização ou solubilização, respectivamente.

A CoDA também superou a MoDA nas concentrações de P e N amoniacal, no T₁, muito embora as concentrações de K na carga do T₁ fossem menores que a do T₀. A abóbora paulista presente no substrato apontou para maior eficiência de remoção de ST e se equiparou a MonoDA na remoção de SV.

A amônia livre, ou íon amônio, é produto da fermentação anaeróbia de proteínas, uréia e ácidos nucleicos (Rosa *et al.*, 2023) e pode ser constatada a partir da análise de nitrogênio amoniacal (N-amon). Para tanto, o N-amon encontrado em maior quantidade no T₁ (1,7±0,3 g.L⁻¹) revela que este tratamento apresentou os menores rendimentos de biogás e metano e isso possivelmente esteja relacionado à formação de amônia livre em concentrações limitantes à DA, visto que a relação C/N foi baixa, as maiores alcalinidades parciais e totais também foram inerentes a este tratamento, com pH acima de 8.

Tais características notadamente apontam para o excesso de íon amônio no T₁, além de que a literatura aponta que concentrações acima de 1.000mg N-NH₃Kg⁻¹ tem efeito inibitório a DA (Castro *et al.*, 2024). Rosa *et al.* (2023), em estudo de CoDA com resíduos de jabuticaba obtiveram concentrações de N-amon muito inferiores a deste estudo, porém satisfatórias à DA, na ordem de 26,6 a 58,58 mg.L⁻¹, enquanto Damaceno (2019), em estudo de CoDa de batata doce com resíduo de flotador de abate de aves, observou ação inibitória da metanogênese com N-amon na faixa de 3.050,00 a 3.298,00 mg.L⁻¹, cujos parâmetros intervenientes observados dos tratamentos com maior concentração de N-Amon, corroboram com as conclusões deste estudo.

Do ponto de vista agrônomo, a presença do nitrogênio amoniacal é uma vantagem, pois os íons de amônio, ora formados, estão prontamente disponíveis para as culturas quando aplicados como biofertilizantes (Cucina *et al.*, 2021). As concentrações de P e dos macronutrientes secundários Ca e Mg, assim como os micronutrientes Fe, Mn, Na e Zn foram maiores na MonoDA, comparado às CoDAs, com exceção ao Mg, Cu e Fe que se equiparou ao T₃.

As concentrações de P variaram de 10,0±1,5 a 15,3±5,0 g.KgST⁻¹ na CoDA, e de 32,1±5,0 g.KgST⁻¹ no T₁, sendo que esse último apresentou o maior valor sobressaindo ao T₃ e T₄. O fósforo é um dos nutrientes mais importantes para os processos fisiológicos e bioquímicos dos vegetais, na realização da fotossíntese (Rosa *et al.*, 2023), e a sua presença no biofertilizante fortalece a proposta de sua aplicação agrônoma.

A carga de abastecimento do T₀ apresentou as maiores concentrações de todos os nutrientes (NTK, P, K, N-amon, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Na e Zn). Se a DA tivesse ocorrido na mesma taxa de conversão para a CoDA, esperava-se que proporcionalmente o biofertilizante da MonoDA apresentasse também as maiores concentrações para todos dos nutrientes. Entretanto, observou-se que, com a CoDA, foi possível melhorar a qualidade do biofertilizante em favor dos macronutrientes primários NTK e Potássio, N-amon, e se equiparou a MonoDA em relação a Mg, Cu e Fe.

Considerando que o desempenho geral do biodigestor possui relação com as concentrações dos intermediários gerados durante a fermentação (Adnane *et al.*, 2024), e que o ácido acético é um dos mais relevantes na DA, a qual esperava que houvesse a remoção completa, o fato de constatar ácido acético no biofertilizante

(Tabela 23), indica que fatores como alcalinidade e a presença de amônia livre em concentrações acima do limite de tolerância dos microrganismos metanogênicos acetoclásticos tenha provocado inibições à DA (Wilson *et al.*, 2012; Beraud-Martínez *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

Assim, pressupõe que as conversões de MO à biogás e íons no biofertilizante foram limitadas pela amônia e alcalinidade, o que poderia alcançar potencial de conversões ainda maiores nas CoDAs, caso as relações C/N estivessem em equilíbrio.

Na carga de abastecimento, o cobre (Cu^{2+}) teve concentrações de $0,9 \pm 0,3 \text{ g.kgST}^{-1}$ na MonoDA e de $0,1 \pm 0,1$ a $0,3 \pm 0,1 \text{ g.KgST}^{-1}$ nas CoDA, o que demonstra que este cofator pode ter contribuído de forma negativa à fase hidrolítica no T_0 , visto que essa reage bem as concentrações menores de 500 mg.L^{-1} . No biofertilizante, este quadro se manteve no T_0 , com concentrações de $0,2 \pm 0,1 \text{ g.KgST}^{-1}$, quando o limite máximo à fase metanogênica é de 130 mg.L^{-1} , assim como o T_3 também apresentou concentrações acima da recomendada, com $0,2 \pm 0,1 \text{ g.KgST}^{-1}$, enquanto o T_1 , T_2 e T_4 compreenderam valores abaixo de $0,1 \pm 0,1 \text{ g.KgST}^{-1}$, dentro da faixa ideal para DA (Ram e Nikhil, 2022).

Em relação ao Fe, as maiores concentrações no biofertilizante foram de $0,7 \pm 0,1$ e $0,6 \pm 0,0 \text{ g.KgST}^{-1}$, no T_0 e T_3 , seguidos de $0,4 \pm 0,0 \text{ g.KgST}^{-1}$ no T_4 , T_1 e T_2 , esses três últimos com as menores concentrações. Tanto na entrada como na saída do biodigestor, as concentrações se apresentaram dentro da faixa recomendada de 50 a 4000 mg.L^{-1} , e nenhuma se aproximou do limite de inibição da DA, que é de 20.000 mg.L^{-1} (Ram; Nikhil, 2022).

O Na é um micronutriente vegetal, porém deve ser objeto de atenção porque em concentrações elevadas apresenta efeito fitotóxico (Cucina *et al.*, 2021). O resultado com maior concentração de Na foi o T_0 , enquanto o menor, o T_3 , foi o que apresentou os melhores resultados concernentes ao rendimento de biogás e metano.

As concentrações de Zn apresentaram valores elevados tanto na carga de entrada, com concentrações que variaram de $6,0 \pm 1,1$ a $21,5 \pm 1,2$, quanto na saída do biodigestor, de $1,2 \pm 0,3$ a $0,9 \pm 0,3 \text{ g kgST}^{-1}$. Entretanto, essas concentrações se mostraram abaixo das encontradas por Cucina *et al.* (2021) para ARS, de $85,3 \text{ g.L}^{-1}$ com DA de dejetos suínos.

O T_3 , com o maior rendimento de biogás e metano, que denotou a melhor eficiência de remoção de carbono, foi o tratamento que teve as maiores conversões à

NTK ($44,1 \pm 1,2 \text{ g.kgST}^{-1}$) e Fe ($0,6 \pm 0,0 \text{ g.kgST}^{-1}$), estatisticamente iguais as concentrações do T₀, assim como revelou a menor concentração de Na no meio, em torno de seis vezes menor que a MonoDA.

O N, P e K aumentaram suas concentrações no biofertilizante em relação as cargas de abastecimento em todos os tratamentos, revelando a eficiência das conversões do carbono presente no substrato, e liberando tais nutrientes na forma de íons no biofertilizante. Estudos apontam que devido as características nutricionais, é possível obter biofertilizantes com potencial de adubação igual aos fertilizantes minerais, com a vantagem da reciclagem de elementos finitos e de alto custo de aquisição, agregando valores aos resíduos.

Assim, mesmo para os tratamentos que o processo de DA não teve as maiores conversões a biogás, o potencial para o uso agrônômico do biofertilizante foi alcançado, apresentando a vantagem de aplicação para o cultivo agrícola.

Recomenda-se especialmente a aplicação do biofertilizante na produção das variedades de abóboras contempladas neste estudo. Assim, seria possível reduzir custos de produção, ao economizar com a aquisição de fertilizantes minerais, ainda que parcialmente, bem como com a adoção de destinação ambientalmente adequada aos digeridos.

5.2.6 Índice de Germinação, pH e condutividade elétrica

Em práticas agrícolas, a aplicação de biofertilizante pode resultar na fitoestimulação de espécies vegetais, com a promoção do crescimento ou desenvolvimento a partir da presença de hormônios, extratos de plantas ou de microrganismos benéficos. Concorrente a isso, o biofertilizante pode apresentar efeitos fitotóxicos, e inibir o desenvolvimento da cultura vegetal.

Para tanto, o índice de germinação (IG) é um teste aplicado com a intenção de mensurar a fitoestimulância ou fitotoxicidade desse biofertilizante, avaliado em percentual, com enquadramento em faixas de valores de IG, uma vez que abaixo de 50% indicam alta fitotoxicidade, entre 50% e 80%, fitotoxicidade moderada, acima de 80% indicam ausência de fitotoxicidade e valores acima de 100% são considerados fitoestimulantes (Cucina *et al.*, 2021).

De acordo com os testes realizados em laboratório, com os biofertilizantes dos T₀, T₁, T₂, T₃ e T₄, diluídos a uma concentração de 15%, foram aplicados em sementes

de agrião de jardim, e todos os tratamentos apresentaram IG < 76,3%, ou seja, nenhum tratamento apresentou fitoestimulância, conforme valores da Tabela 25.

Tabela 25 Valores médios das variáveis Índice de Germinação (IG), pH, condutividade elétrica (CE), acidez volátil (AV) e sódio (Na).

Trat,	IG (%)	pH	CdE (mS cm ⁻¹) *	AV (mg L ⁻¹)*	Na (g.Kg ST ⁻¹) *
T ₀	70,0 ^A ±13,2	8,4 ^{BC} ±0,1	4,9 ^C ±0,2	301,2 ^C ±80,3	49,3 ^A ±5,8
T ₁	43,9 ^B ±18,6	8,4 ^{ABC} ±0,2	9,2 ^A ±0,5	534,0 ^{ABC} ±57,8	17,6 ^{AB} ±2,4
T ₂	76,3 ^A ±13,2	8,7 ^A ±0,1	7,6 ^{BC} ±0,3	339,0 ^C ±41,1	16,6 ^{AB} ±3,4
T ₃	46,7 ^B ±14,2	8,2 ^C ±0,2	8,4 ^{AB} ±0,6	1516,8 ^A ±63,9	8,0 ^C ±1,2
T ₄	55,5 ^B ±18,7	8,6 ^{AB} ±0,3	8,1 ^{AB} ±0,4	1074,0 ^{AB} ±76,7	12,1 ^{BC} ±1,1

(*) Kruskal-Wallis.

Fonte: A autora (2024).

Em biofertilizantes que passaram por processo de DA é comum a ocorrência de fitotoxicidade, e geralmente está relacionada as concentrações elevadas de substâncias solúveis, como nitrogênio amoniacal, sais e ácidos graxos voláteis (Damaceno *et al.*, 2019; Cucina *et al.*, 2021). Dessa forma, o pH, a CE, a concentração de AV e NTK são parâmetros que subsidiam a compreensão dessa fitotoxicidade.

O T₂ e o T₀ tiveram os maiores índices de germinação e se enquadraram na classificação “moderadamente fitotóxico”. Por consequência, apresentaram as menores condutividades elétricas e as menores AV no biofertilizante, muito embora o pH alcalino. Além disso, na CoDA, observou-se que os IGs apresentaram tendência de aumento nos tratamentos em que as abóboras foram cozidas, comparadas aos tratamentos contendo as mesmas variedades, porém cruas.

Conquanto, os menores IG's foram observados no T₁, T₃ e T₄, enquadrando-se como fitotóxicos. A presença de algum agente inibidor nesses tratamentos ficou evidente, sobretudo naqueles contendo abóbora crua, de efeito fitotóxico a germinação da *Lepidium sativum*. Para tanto, neste ocorreu as maiores concentrações de AVs e as maiores CE.

As concentrações de Na foram de 49,3±5,8, 17,6±2,4, 16,6±3,4, 8,0±1,2 e 12,1±1,1, no T₀, T₁, T₂, T₃ e T₄, respectivamente, e ambas se enquadraram na faixa da qual a quantidade de Na inibe o desenvolvimento vegetal.

O teste de fitotoxicidade traz informações sobre a qualidade do biofertilizante no que se refere ao seu uso, principalmente em condição de produção de mudas. Neste caso, apenas os tratamentos T₀ e T₂ apresentam condição de uso, com baixa probabilidade de comprometer o desenvolvimento das plantas. Entretanto, o uso do

biofertilizante como fertilizante renovável em grandes culturas, como gramíneas, não apresenta risco à germinação das plantas, pois não estará em contato direto com as sementes.

5.2.7 Análise de viabilidade financeira

A análise de investimento de projetos, para os cenários T_0 , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , foi realizada por meio de fluxos de caixas livre e descontado, considerando as receitas e as despesas, em um horizonte de 10 anos, com a taxa mínima de atratividade (TMA) de 10,5%, referente a taxa básica de juros da economia brasileira (SELIC). No primeiro ano do fluxo de caixa, considerou-se apenas 8 dos 12 meses do ano, haja vista que os 4 primeiros meses foram destinados à implantação do projeto e, portanto, sem produção de biogás e biofertilizante nesse período. Assim, o compute das receitas com biofertilizante e biogás no primeiro ano foi de 66,7% da produção anual.

Uma vez que os cinco cenários corresponderam a uma cooperativa que produz o volume diário de 120,4 m³ de ARS, e com exceção a MonoDA (0,8% de ST), os demais tratamentos admitiram teor de 5% ST no reator, com volume dos biodigestores em torno de 5.000 m³. Logo, os custos de investimento com o biodigestor não variaram de um cenário para outro, diferente dos custos de investimento e manutenção do conjunto motogerador, que diferiram de acordo com a potência do motogerador (94 e/ou 165 kVA) e as quantidades necessárias em cada cenários.

Os custos de produção anual das abóboras variaram de acordo com a quantidade necessária para abastecer os biodigestores à carga de 5% de ST, estimado em R\$1.096.497,60 com ACr, R\$1.003.415,79 com ACo, R\$1.367.913,02 com MCr e R\$ 1.198.793,64 com MCo. Muito embora o teor de ST para os biodigestores em CoDA fosse de 5%, a quantidade de matéria natural de abóbora necessária a composição da carga de abastecimento variou em função do teor de ST presentes nas variedades e se crua ou cozida, com demanda de maiores quantidades aquelas que em sua composição detinham menores concentrações de sólidos.

Para a cocção das abóboras necessárias no T_2 e T_4 , foram utilizados parte do biogás gerado no sistema para conversão em energia térmica, e, portanto, sem custo de cocção referente. Nos cenários T_0 , T_1 e T_3 não houve necessidade de cocção de abóboras, visto que os respectivos tratamentos foram alimentados com ARS, abóbora

paulista crua e abóbora moranga crua, e, portanto, todo biogás gerado nesses tratamentos foi convertido em energia elétrica e valorado como tal.

Nos cenários, a receita com a geração de energia a partir da produção do biogás foi superior à recuperação de nutrientes no biofertilizante em 1,2 vezes no T₁ (R\$352.400,02 e R\$286.674,98), 4,9 vezes no T₃ (R\$2.280.296,25 e R\$461.184,57) e 1,9 vezes no T₄ (R\$ 610.029,42 e R\$ 324.764,96). Nos demais, essa lógica na receita se inverteu, sendo que no T₀ correspondeu a 0,7 vezes (R\$88.802,55 e R\$122.875,58) e no T₂, 0,4 vezes (R\$120.739,85 e R\$ 277.786,43). O cenário de CoDA com abóbora moranga crua (T₃) foi que proporcionou o maior rendimento energético e recuperação de nutrientes.

Para verificar a rentabilidade dos cenários propostos, abaixo segue as informações dos projetos, constando dos fluxos de caixa livres (FCL), fluxos de caixa descontados (FCD) e os indicadores econômicos de valores presentes líquidos (VPL), índices de lucratividades (IL), taxas internas de retorno (TIR) e Paybacks descontados, no Apêndice A.

Com exceção ao 5º e 10º ano, os demais FCL e FCD do T₀ apresentaram saldos positivos, no entanto com VPL negativo de R\$ 824.368, o que levou a conclusão de que o risco do investimento no tempo não compensaria, e que logo, não há viabilidade de investimento do projeto. A quantidade de biogás gerada no T₀ não permite recuperar o investimento, mesmo sendo o projeto com menor custo entre os tratamentos. Isso ocorre porque existem custos padronizados que exigem um rendimento maior de biogás e/ou biofertilizante para serem amortizados.

Os valores negativos no FCL e FCD nos T₁, T₂ e T₄, apontaram para a inviabilidade para esses cenários também. Nota-se que os custos variáveis, nos 10 anos de vida do projeto, superaram as receitas/ingressos em 1,72, 2,52 e 1,28 vezes no T₁, T₂ e T₄, respectivamente, antes mesmo das deduções dos impostos. E, portanto, Assaf Neto (2019) chama a atenção no sentido de que, são os investimentos fixos nas operações que definem o futuro de uma empresa, sua viabilidade e competitividade, e só é atraente quando criar valor aos seus proprietários, o que não ocorre nesses cenários.

No T₂ e T₄, há de se considerar que parte do biogás produzido foi utilizado para a cocção, reduzindo os custos variáveis que se teria com gás GLP, sendo que, com a utilização do biogás, também reduziu as receitas do T₂ e T₄. Dessa forma, os menores

rendimentos no T_1 e T_2 , bem como no T_4 , se alinham com as menores produções específicas de biogás e metano entre os tratamentos.

Como consequência dos prejuízos acumulados nos FCD, o VPL também resultou em valores negativos da ordem de R\$5.136.938, R\$5.882.552,17 e R\$5.092.718,11 nos T_1 , T_2 e T_4 , respectivamente, não sendo possível calcular o IL, a TIR e o Payback descontado desses projetos, o que os caracteriza como inviáveis no horizonte de 10 anos.

No T_3 , obteve-se receitas superiores aos custos da ordem de 2 vezes mais, FCL e FCD com saldo positivo a partir do primeiro ano. Ao avaliar o risco do investimento no tempo, o VPL resultou em saldo positivo de R\$1.717.823, demonstrado pelo IL de 1,98, que a cada R\$ 1,00 investido o retorno seria de R\$ 0,98, ou seja, houve superávit em 98%.

Com vistas a recuperação do capital investido no período de 10 anos, a TIR do projeto T_3 foi de 30,5%, ou seja, maior que outros investimentos seguros que a cooperativa poderia fazer, a uma taxa 10,5%, concluindo a partir do VPL e a TIR, que o projeto é viável. O Payback descontado de 3,68 anos confirmou as respostas obtidas com os indicadores econômicos de VPL e TIR acerca da viabilidade do projeto, visto que a partir em poucos anos seria possível pagar o investimento, com superávit a partir de então.

Dessa maneira, o T_3 é um projeto que apresentou viabilidade técnica e financeira, por ter alcançado a maior produção específica de biogás dentre os tratamentos, de $1.025,9 \pm 77,6 \text{ L kgSV}^{-1}$ (Tabela 19), superando o T_0 em aproximadamente 18% ($839,4 \pm 79,7 \text{ L kgSV}^{-1}$), e assim, os rendimentos de biogás e metano foram capazes de superar os custos variáveis, fixos e de investimento, a uma TIR 2,9 vezes superior a TMA, proporcionar um margem de lucro rentável, com retorno do capital investido em 3,68 anos, o que demonstrou valor do dinheiro no tempo.

As respostas desse estudo foram similares às encontradas por outras pesquisas com culturas energéticas, como no caso de Montoro (2019) em estudo de CoDA da batata-doce com esterco de gado leiteiro na recuperação de energia e nutrientes por meio de digestores semicontínuo. Em um horizonte de 10 anos, a autora constatou viabilidade financeira para os cenários da CoDA, em que a TIR encontrada superou a MonoDA em pelo menos 5,8 vezes. Superação similar foi abordada por Damaceno (2018), em estudo de CoDA do lodo de abate de frangos com quantidades

crescentes de batata-doce, que verificou viabilidade para os cenários num horizonte de 15 anos, com $VPL > 0$, $TIR > TMA$ (7,9%), $IL > 60\%$ e a recuperação do capital em, no máximo, 5,5 anos.

Contudo, há outros fatores que poderiam ser levados em consideração, em se tratando de uma cooperativa agroindustrial, eis que os ingressos (denominados de receitas para outras personalidades jurídicas), são passíveis de enquadramento como atos cooperativos, o que implicaria na isenção de impostos e da contribuição social. Outro aspecto é que, ao destinar o biofertilizante e a energia proveniente do biogás aos processos produtivos internos da cooperativa ou aos cooperados, haveria uma melhoria da eficiência operacional, com redução de custos e aumento da margem de lucros, mas como o biofertilizante e biogás não seriam produtos de venda, não seriam computados como receita bruta, e não havendo entrada no fluxo de caixa, não haveria dedução de impostos diretamente.

Além disso, as UPLs pela natureza dos resíduos gerados e o seu potencial poluidor, em suma, devem admitir alguma alternativa de tratamento dos resíduos para o atendimento as diretrizes ambientais no âmbito nacional e internacional.

Assim, as plantas de produção agroindustriais, como o caso de cooperativas com sistemas integrados, também terão custos com investimentos em tecnologias iguais ou similares a proposta neste estudo, porém em sua maioria, sem agregar valor potencial ao biofertilizante e biogás, que poderiam viabilizar tais projetos ao levar em conta a avaliação do fluxo de caixa em conjunto com a planta produtiva de suínos.

6 CONCLUSÃO

A CoDA da ARS com a variedade de abóbora moranga triturada e crua, apresenta viabilidade técnica de produção específica de biogás e metano, que supera a MonoDA de ARS, demonstrando a viabilidade técnica de aplicação com CE, devido a existência de efeitos sinérgicos à DA.

O modelo de Cone apresentou melhor ajuste à evolução real da produção de metano, à de aplicação de reatores contendo como substrato água residuária da suinocultura em Codigestão Anaeróbia com as variedades de abóboras paulista e moranga, devido a eficiência dos ajustes, o que permite aplicá-lo à escala real e a estimar os parâmetros de interesse tanto para avaliar previamente a viabilidade técnica como financeira de projetos.

Os efeitos sinérgicos da inserção de moranga crua no T₃ permitem rentabilidade ao projeto, com viabilidade também financeira, superando os riscos do investimento no tempo, com liquidez e superávit, o que além de atrativo do ponto de vista ambiental, é também do ponto de vista econômico.

Sugere-se o desenvolvimento de outros estudos com proporções distintas de ARS e abóbora, e ou até mesmo a inserção de um terceiro substrato, capaz de adequar a relação C/N, possibilitando aumentar a produção específica de biogás na CoDA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE SUÍNOS. **Primeiro semestre de 2023 termina com oferta de carne suína ajustada e custo de produção em queda**. 2023. Disponível: <https://abcs.org.br/noticia/primeiro-semester-de-2023-termina-com-oferta-de-carne-suina-ajustada-e-custo-de-producao-em-queda/>. Acesso em: 10 out. 2023.

ABPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. **Relatório Anual 2024**. 2024. Disponível em: <https://abpa-br.org/abpa-relatorio-anual/>. Acesso em: 20 out. 2024.

ADNANE, M.; TAOUMI, H.; ELOUAHABI, K.; LAHRECH, K.; OULMEKKI, A. Valorization of crop residues and animal wastes: anaerobic co-digestion technology, **Heliyon**, Cambridge, v. 10, n. 5, 2024. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)02471-X](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)02471-X). Acesso em: 30 out. 2023.

AMARO, G. B.; HANASHIRO, M. M.; PINHEIRO, J. B.; MADEIRA, N. R.; FAUSTINO, R. M. E. B. **Recomendações técnicas para o cultivo de abóboras e morangos. Circular Técnica 175** ed. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalicas/buscadepublicacoes/publicacao/1134117/recomendacoes-tecnicas-para-o-cultivo-de-aboboras-e-morangos>. Acesso: 05 jan. 2022.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Evolução dos preços de GLP (R\$ / botijão de 13 kg)**. Superintendência de Defesa da Concorrência – SDC. 2024.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19 ed. Washington: APHA, 1999.

AQUINO, S.F.; CHERNICHARRO, C.A.L.; FORESTI, E.; SANTOS, M. L. F.; MONTEGGIA, L.O. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 12. n. 2. p. 192-201, 2007.

ASSAF NETO, A. **Curso de Administração Financeira**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597022452/>. Acesso em: 14 jul. 2022.

BARBIERI, R. L. **A diversidade de abóboras no Brasil e sua relação histórica com a cultura**. 2012. Desenvolvida por Embrapa. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/918029>. Acesso em: 30 set. 2022.

BARBOSA, G. S. **Desempenho agrônômico. caracterização morfológica e polínica de linhagens de abóbora (*Cucurbita moschata*) com potencial para o lançamento de cultivares**. 2009. 110f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2009.

BERAUD-MARTÍNEZ, L. K.; BETANCOURT-LOZANO, M.; GÓMEZ-GIL, B.; ASAFF-TORRES, A.; MONROY-HERMOSILLO, O. A.; FRANCO-NAVA, M. A. Methyilotrophic methanogenesis induced by ammonia nitrogen in an anaerobic digestion system, **Anaerobe**, Nova York, v. 88, p. 102877, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38866129/>. Acesso em: 15 out. 2022.

BLÁZQUEZ, F. C.; GONZÁLEZ, A. G.; SÁNCHEZ, C. S.; RODRÍGUEZ, V. D.; SALCEDO, F. C. Waste valorization as an example of circular economy in Extremadura (Spain). **Journal of Cleaner Production**, Nova York v. 181. p. 136-144, 2018. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018JCPro.181.136C/abstract>. Acesso em: 13 nov. 2023.

BRASIL. **Lei do Cooperativismo nº 5.764 de 16 de dezembro de 1971**. BRASIL. Constituição Federal de 1988: O papel do Estado junto às cooperativas. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l5764.htm >. Acesso em: jul. 2024.

BURANELLO, Rd.; SOUZA, A. R. P.; PERIN JUNIOR, E. Sistemas Agroindustriais e Contratos de Integração Vertical. **AgriForum**, Rio de Janeiro, v.1, 2014. Disponível em: <<http://agriforum.agr.br/sistemas-agroindustrias-econtratos-de-integracao-vertical/>>. Acesso em: jul. 2020.

CARMO, D. L.; SILVA. C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1211-1220, 2012.

CASTRO, L. E. N.; BARROSO, T. L. C. T.; SGANZERLA, W. G.; COSTA, J. M.; SAIA, F. T.; COLPINI, L. M. S.; FORSTER-CARNEIRO, T. Subcritical water hydrolysis of grape pomace as a sustainable pretreatment for anaerobic digestion in a biorefinery concept, **Fuel**, Nova York, v. 363, p. 130899, 2024.

CAVALCANTE, W. A.; LEITÃO, R. C.; GEHRING, T. A.; ANGENENT, L. T.; SANTAELLA, S. T. Anaerobic fermentation for n-caproic acid production: A review, **Process Biochemistry**, Nova York, v. 54, p. 106-119, 2017.

COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifas de energia elétrica**. 2024. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/> >. Acesso em: 15 mai. 2024.

CREMONEZ, P. A.; SAMPAIO, S. C.; TELEKEN, J. G.; MEIER, T. W.; DIETER, J.; TELEKEN, J. Influence of inoculum to substrate ratio on the anaerobic digestion of a cassava starch polymer, **Industrial Crops and Products**, Montana, v. 141, p. 111709, 2019.

CUCINA, M.; CASTRO, L.; ESCALANTE, H.; FERRER, I.; GARFÍ, M. Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia, **Waste Management**, Houston, v. 135, p. 220-228, 2021.

DAL BOSCO, T. C.; COSMANN, N. J.; SBIZZARO, M.; TAIATELE JUNIOR, I.; SILVA, J. dos S. Caracterização de águas residuárias de suinocultura provenientes de dois sistemas de tratamento. **Revista Agrogeoambiental**. Pouso Alegre, v. 8, n. 3. p.11-120. 2016.

DALPAZ, R. **Avaliação energética do biogás com diferentes percentuais de metano na produção de energia térmica e elétrica**. 2019. 106f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, Rio Grande do Sul, 2019.

DAHUNSI, S. O.; ORANUSI, S.; OWOLABI, J. B.; EFEOVBOKHAN, V. E. Comparative biogas generation from fruit peels of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) and its optimization. **Bioresource Technology**, Honolulu, v. 221, p. 517-525, 2016.

DAHUNSI, S. O.; ORANUSI, S.; EFEOVBOKHAN, V. E.; ZAHEDI, S.; OJEDIRAN, J. O.; OLAYANJU, A.; OLUYORI, A. P.; ADEKANYE, T. A.; IZEBERE, J. O.; ENYINNAYA, M. Biochemical conversion of fruit rind of *Telfairia occidentalis* (fluted pumpkin) and poultry manure. **Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, Londres, v. 40, n. 23, p. 2799-2811, 2018.

DAHUNSI, S. O.; OLAYANJU, T. M. A.; ADESULU-DAHUNSI, A. T. Data on optimization of bioconversion of fruit rind of *Telfairia occidentalis* (Fluted pumpkin) and poultry manure for biogas generation. **Chemical Data Collections**, Amsterdam, v. 20, p. 100192, 2019.

DAMACENO, F. M. **Codigestão anaeróbia do lodo obtido em abatedouros de frangos e batata-doce: valorização energética e agrônômica**. 2018. 96f. Dissertação (Mestrado)– Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, 2018.

DAMACENO, F. M.; BULIGON, E.; RESTREPO, J. C. P. S.; CHIARELOTTO, M.; NIEDZIALKOSKI, R. K.; COSTA, L. A. M.; LUCAS JUNIOR, J.; COSTA, M. S. S. M. Semi-continuous anaerobic co-digestion of flotation sludge from broiler chicken slaughter and sweet potato: nutrients and energy recovery. **Science of the Total Environment**. Amsterdam, v. 683, n. 15, p. 773-781. 2019a.

DAMACENO, F. M.; CHIARELOTTO, M.; RESTREPO, J. C. P. S.; BULIGON, E. L.; COSTA, L. A. M.; LUCAS JUNIOR, J.; COSTA, M. S. S. M. Anaerobic co-digestion of sludge cake from poultry slaughtering wastewater treatment and sweet potato: Energy and nutrient recovery. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 133, p. 489-499, 2019b.

DENG, Z.; FERREIRA, A. L. M.; SPANJERS, H.; VAN LIER, J. B. Anaerobic protein degradation: Effects of protein structural complexity. protein concentrations.

carbohydrates. and volatile fatty acids. **Bioresource Technology Reports**, Amsterdam, v. 22, p. 101501, 2023.

DHANALAKSHMI, S. V.; RAMANUJAM, R. A. Biogas generation in a vegetable waste anaerobic digester: an analytical approach. **Research Journal of Recent Sciences**, v.1, n.3, p.41-47, 2012.

DUARTE JÚNIOR, A. M. **Análise de investimentos em projetos: viabilidade financeira e risco**. 2 ed. São Paulo: Saint Paul Editora, 2024.

DUPONT, G. K.; FLORA, I. K. D.; CLERICI, N. J.; SERAFINI, C. G.; HOFFMANN, J. I.; WELTER, N.; PORTA, P. G. D.; WEBER, P. F. Co-Digestão Anaeróbica de dejetos de animais e resíduos lignocelulósicos: uma revisão do potencial de produção de metano. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.9, p. 71901–71909, 2020.

EGWU, U.; OKO. E.; NDUKWU, M. C.; SALLIS, P. Novel low-cost pretreatment material for enhancing the methane yield during anaerobic digestion of lignocellulosic biomass feedstocks: experimental and kinetic study. **Renew Energy**, Amsterdam, v. 179, p. 584-592, 2021.

ELALAMI, D.; CARRERE, H.; MONLAU, F.; ABDELOUAHDI, K.; OUKARROUM, A.; BARAKAT, A. Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 114, p. 109287, 2019.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Crops and livestock products: pumpkins. squash end gourds**. 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 04 out. 2021.

FILA, W.A., ITAM, E.H., JOHNSON, J.T., ODEY, M.O., EFFIONG, E.E., DASOFUNJO, K., AMBO, E. E. Comparative proximate compositions of watermelon *Citrullus lanatus*, squash *Cucurbita pepo* l and rambutan *Nephelium lappaceum*. **International Journal of Scientific & Technology Research**. [S.l], v. 2, n. 1, p. 81–88, 2013.

FISCHER, S. Z., BARBIERI, R. L., STUMPF, E. R. T., PEIL, R. M. N., SCHWENGBER, J. **Cultivo e uso de abóboras ornamentais**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Clima Temperado. Pelotas: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbico. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES. 1999, pp. 29-51.

GIROTTTO, M. C.; SILVA, M. L. F. **Tributação de sociedades cooperativas agropecuárias**. 2019. 19f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) – Curso de Ciências Contábeis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2019

GOMES, R. S. **Variabilidade morfoagronômica e nutricional de acessos de *Cucurbita moschata* Duch, do banco de germoplasma de hortaliças**. 2017. 48f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Genética e Melhoramento, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

GONZÁLEZ, J. F.; PARRALEJO, A. I.; GONZÁLEZ, J.; ÁLVAREZ, A.; SABIO, E. Optimization of the production and quality of biogas in the anaerobic digestion of different types of biomasses in a batch laboratory biodigester and pilot plant: Numerical modeling. kinetic study and hydrogen potential. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdam, v. 47, n. 93, p. 39386-39403, 2022.

GRAHAM, J. R.; HARVEY, C. R. The theory and practice of corporate finance: evidence from the field. **Journal of Financial Economics**, Philadelphia, v. 60, n.2, p. 187-243, 2001.

GUNES, B.; STOKES, J.; DAVIS, P.; CONOLLY, C.; LAWLER, J. Pre-treatments to enhance biogas yield and quality from anaerobic digestion of whiskey distillery and brewery wastes: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 113, p. 109-281, 2019.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Atlas climático do estado do Paraná**: classificação climática. 2019. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>. Acesso em: 12 jan. 2022.

ITO, M.; GUIMARÃES, D. D.; AMARAL, G. F. Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro. v. 44, p. 125-156, 2016.

JIN, Y.; LI, Y.; LI, J. Influence of thermal pretreatment on physical and chemical properties of kitchen waste and the efficiency of anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v.180. p. 291-300. 2016.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2005.

JÚNIOR, Antonio Marques D. **Análise de investimentos em projetos**: Viabilidade financeira e risco 2º. 2 ed. São Paulo: Saint Paul Editora, 2024.

KARKI, R.; CHUENHART, W.; SURENDRA, K. C.; SUNG, S.; RASKIN, L.; KHANAL, S. K. Anaerobic co-digestion of various organic wastes: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 343, p. 126063, 2022.

KARP, A.; HALFORD, N. G. Energy Crops: chapter 1. *In*: KARP, A.; HALFORD, N. G. **Energy Crops**: Introduction. Londres: Royal Society of Chemistry, 2011. pp.1-12.

KHATUN, M.; NIME, J.; NANDI, R.; ALAM, M.; SAHA, C. K. Co-digestion of poultry droppings and banana waste for maximizing biogas production in Bangladesh. **Fuel**, Nova York, v. 346, p.128346, 2023.

KOO, T.; SHIN, S. G.; LEE, J.; HAN, G.; KIM, W.; CHO, K. Identifying methanogen community structures and their correlations with performance parameters in four full-scale anaerobic sludge digesters. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 228, p. 368-373, 2017.

KUMAR, A; SAMADDER, S. R. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: a review. **Energy**, Amsterdam, v. 197, p. 117253, 2020

KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera/Embrapa Suínos e Aves, 2022.

KURADE, M. B.; SAHA, S.; KIM, J. R.; ROH, H. S; JEON, B. H. Microbial community acclimatization for enhancement in the methane productivity of anaerobic digestion of fats, oil, and grease. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 296, p.122294.

LANG, K. L. **Obtenção de cucurbitacinas a partir de plantas nativas e modificações estruturais visando à síntese de compostos bioativos**. 2012. 304f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2012.

LI, C.; LÜ, F.; PENG, W.; HE, P.; ZHANG, H. Efficacy of bioaugmentation with nondomesticated mixed microbial consortia under ammonia inhibition in anaerobic digestion, **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 391, p. 129954, 2024.

LIEW, Z. K.; CHAN, Y. J.; HO, Z. T.; YIP, Y. H.; TENG, M. C.; BIN, A. I. T. A. A.; CHONG, S.; SHOW, P. L.; CHEW, C. L. Biogas production enhancement by co-digestion of empty fruit bunch (EFB) with palm oil mill effluent (POME): Performance and kinetic evaluation. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 179, p. 766-777, 2021.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS. 1997.

MATINC, C.; TONETTO, J. F.; HASAN, C.; KONRAD, O. Potencial de produção de biogás a partir da co-digestão de dejetos da suinocultura e bovinocultura. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v.8. n.4. p.154-161, 2017.

MCGREGOR, S. E. Pumpkin and squash. *Cucurbita spp. family Cucurbitaceae*. Chapter 6: Common Vegetables for Seed and Fruit. In: MCGREGOR, S. E. **Insect pollination of cultivated crops plants**, Washington: USDA. 1976. pp. 558-566. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20220500/onlinepollinationhandbook.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

MENESES-QUELAL, W. O.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; GAIBOR-CHÁVEZ, J.; NIÑO-RUIZ, Z. Biochemical potential of methane (BMP) of camelid waste and the Andean region agricultural crops. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 168, p. 406-415, 2021.

MONTORO, S. B. **Co-digestão de batata doce com dejetos de bovinos leiteiros: uma avaliação técnica e econômica para produção de energia e biofertilizante**. 2017. 91f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Agronomia (Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista, Botucatu. São Paulo, 2017.

MONTORO, S. B.; LUCAS JUNIOR, J.; SANTOS, D.F.L.; COSTA, M. S. S. M. Anaerobic co-digestion of sweet potato and dairy cattle manure: A technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 226, p. 1082-1091, 2019.

MONTORO, S. B. **Análise técnico e econômica da codigestão anaeróbia da cama de frangos com culturas energéticas para geração de energia**. 2020. 99f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, São Paulo, 2020.

MORAIS, N. W. S.; COELHO, M. M. H.; SILVA, A. S.; SILVA, F. S. S.; FERREIRA, T. J. T.; PEREIRA, E. L.; SANTOS, A. B. Biochemical potential evaluation and kinetic modeling of methane production from six agro-industrial wastewaters in mixed culture. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v. 280, p.116876, 2021.

MUKHERJEE, P. K.; SINGHA, S.; KAR, A.; CHANDA, J.; BANERJEE, S.; DASGUPTA, B.; HALDAR, P. K.; SHARMA, N. Therapeutic importance of cucurbitaceae: a medicinally important Family. **Journal of Ethnopharmacology**, Amsterdam, v. 282, p. 114599, 2022.

NICK, C.; BORÉM. A. **Abóboras e morangas. do plantio a colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2017.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR. Jorge de. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos com e sem separação da fração sólida em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal. v. 29, n. 3. p. 474-482, 2009.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Avaliação de parâmetros da biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos alimentados com dietas à base de milho e sorgo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal. v. 30, n. 4, p. 600-607., 2010.

PAES, J. E. S. **Terceiro Setor e Tributação**: vol. 7. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-309-5909-8/>. Acesso em: 14 jul. 2024.

PAN, Y.; ZHI, Z.; ZHEN, G.; LU, X.; BAKONYI, P.; LI, Y.; ZHAO, Y.; BANU, J. R. Synergistic effect and biodegradation kinetics of sewage sludge and food waste mesophilic anaerobic co-digestion and the underlying stimulation mechanisms. **Fuel**, Nova York, v. 253, p. 40-49, 2019.

PARANÁ. Secretaria do Trabalho. Qualificação e Renda do Estado do Paraná. **Salário mínimo regional**. 2024. Disponível em:

<https://www.trabalho.pr.gov.br/Pagina/Salario-Minimo-Regional>. Acesso em: 15 mai. 2024.

PAULA, A. S.; MARTINS, A. H.; KRAMER, L. C. S.; SILVA, J. A. M. Influências dos métodos de cocção na preservação de antioxidantes e compostos bioativos. análise físico-química e sensorial em abóbora cabotiá (*Curbita Moschata Duch*). **FAG Journal of Health**, Cascavel, v. 1, n. 2, p. 11-23, 2019.

PENTEADO, E. D.; LAZARO, C. Z.; SAKAMOTO, I. K.; ZAIAT, M. Influence of seed sludge and pretreatment method on hydrogen Production in packed-bed anaerobic reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdam, v. 38, p. 6137-6145, 2013.

PRIORI, D.; BARBIERI, R. L.; CASTRO, C. M.; OLIVEIRA, A. C.; VILELLA, J. C. B.; MISTURA, C. C. Caracterização molecular de variedades crioulas de abóboras com marcadores microssatélites. **Horticultura brasileira**, Brasília, v. 30, p. 499-506., 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/rRnSWNFhtSDHvVtdrSQrzFG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 20 set. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**: produtos da lavoura temporária – abóbora. moranga e jerimuns (toneladas). Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/822>. Acesso em: 28 out. 2021.

RAM, N. R.; NIKHIL, G. N. A critical review on sustainable biogas production with focus on microbial-substrate interactions: bottlenecks and breakthroughs, **Bioresource Technology Reports**, Amsterdam, v. 19, p. 101170, 2022.

RAMBO, J. R.; LAFORGA, G.; SANTI, A. Custo de produção e análise econômica de abóbora em Tangará da Serra-MT. **Nucleus**, Ituverava, v. 16, n. 2, p. 245-252, 2019.

RECEITA FEDERAL DO BRASIL. **Instrução Normativa RFB nº 1700, de 14 de março de 2017**: dispõe sobre a determinação e o pagamento do imposto sobre a renda e a contribuição social sobre o lucro líquido das pessoas jurídicas. 2017. Disponível em: <http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?idAto=81268>. Acesso em: 14 jul. 2024.

RESENDE, G. M.; SILVA, R. A.; GOULART, A. C. P. Produtividade da cultivares de moranga e de híbridos do tipo ‘Teksukabuto’ em diferentes épocas de plantio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 14, n. 2, p. 228-231, 1996.

RESENDE, G. M.; BORGES, R. M. E.; GONÇALVES, N. P. S. Produtividade da cultura da abóbora em diferentes densidades de plantio no Vale do São Francisco. **Horticultura brasileira**, Brasília, v. 31, p. 504-508, 2013.

RESENDE, J. A.; GODON, J. J.; BONNAFOUS, A.; ARCURI, P. B.; SILVA, V. L.; OTENIO, M. H.; DINIZ, C. G. Seasonal Variation on Microbial Community and

Methane Production during Anaerobic Digestion of Cattle Manure in Brazil. **Microbial Ecology**, Amsterdam, v. 71, n. 3, p. 735-746, 2016.

RESTREPO, J. C. P. S. **Codigestão anaeróbia de lodo de flotador do abate de frangos e caldo de cana-de-açúcar**. 2019. 64f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, 2019.

RICO, X.; GULLÓN, B.; ALONSO, J. L.; YÁÑEZ, R. Recovery of high value-added compounds from pineapple, melon, watermelon and pumpkin processing by-products: An overview. **Food Research International**, Amsterdam, v. 132, p. 109086, 2020.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestor of High-Strength Waste. **Journal Water Pollution Control Federation**, Amsterdam, v.58. n.5. p.406-411, 1986.

ROSA, R. G.; SGANZERLA, W. G.; BARROSO, T. L. C. T.; CASTRO, L. E. N.; BERNI, M. D.; FORSTER-CARNEIRO, T. Sustainable bioprocess combining subcritical water pretreatment followed by anaerobic digestion for the valorization of jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) agro-industrial by-product in bioenergy and biofertilizer, **Fuel**, Nova York, v. 334, p. 126698, 2023, 126698.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J. **Administração Financeira. Corporate Finance**. 2. ed. São Paulo: Atlas. 2002.

SAAB, M. S. B. L. DE M.; NEVES, M. F.; CLÁUDIO, L. D. G. O desafio da coordenação e seus impactos sobre a competitividade de cadeias e sistemas agroindustriais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, p. 412–422, 2009.

SALAMA, E.-S.; SAHA, S.; KURADE, M. B.; DEV, S.; CHANG, S. W.; JEON, B. H. Recent trends in anaerobic co-digestion: Fat, oil, and grease (FOG) for enhanced biomethanation. **Progress in Energy and Combustion Science**, Amsterdam, v. 70, p. 22-42, 2019.

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

SHAJAN, A. E.; DASH, K. K.; BASHIR, H. O.; SHAMS, R. Comprehensive comparative insights on physico-chemical characteristics, bioactive components, and therapeutic potential of pumpkin fruit, **Future Foods**, Amsterdam, v. 9, p. 100312, 2024.

SILLERO, L.; SOLERA, R.; PEREZ, M. Biochemical assays of potential methane to test biogas production from dark fermentation of sewage sludge and agricultural residues. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdam, v. 47. p. 27-31, 2022.

SILVA, T. H. L.; SANTOS, S. A.; OLIVEIRA, C. R. M.; PORTO, T. S.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, A. F. M. S. Determination of methane generation potential and evaluation of kinetic models in poultry wastes. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, Amsterdam, v. 32, p. 101936, 2021.

SOMERVILLE, C.; BAUER, S.; BRININSTOOL, G.; FACETA, M.; HAMANN, T.; MILNE, J.; OSBORNE, E.; PAREDEZ, A.; PERSSON, S.; RAAB, T.; VORWERK, S.; YOUNG, H. Toward a Systems Approach to Understanding Plant Cell Walls. **Science**, Amsterdam, v. 306, n. 5705, p. 2206–2211, 2004.

SOUZA, J. C. P. V. B.; OLIVEIRA, P. A. V.; TAVARES, J. M. R.; BELLI FILHO, P.; ZANUZZI, C. M. S.; AMARAL, N.; SANTOS, M. A.; TREMEA, S. L.; ZIMMERMANN, L. A.; PIEKAS, F.; SQUEZZATO, N. C. **Gestão da água na suinocultura**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2016.

SOUZA, C. F.; LUCAS JÚNIOR, J.; FERREIRA, W. P. M. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato – considerações sobre a partida. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 530-539, 2005.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura. frangos de corte e suínos**. 2001. 127f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, São Paulo, 2001.

TEPERINO, D. P. M.; NETO, M. A. L.; FERRAREZ, A. H.; GOMES, A. T.; POUBEL, H. S.; SILVA, E. S. Desenvolvimento de digestor anaerobio didático e testes de produção de biogás com resíduos da bovinocultura e cafeicultura. **Acta Biomedica Brasiliensia**, Itaperuna, v. 8, n. 2, p. 57, 2017.

TRANI, P. E.; PASSOS, F. A.; ARAÚJO, H. D. **Calagem e adubação da abobrinha italiana (de moita)(Cucurbita pepo), abóbora brasileira (Cucurbita moschata), moranga (Cucurbita maxima) e abóbora japonesa (híbrida)**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2014.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, Amsterdam, v. 74, n. 10, p. 3583, 1991.

VANNARATH, A.; THALLA, A. K. Effects of chemical pretreatments on material solubilization of Areca catechu L. husk: Digestion, biodegradability, and kinetic studies for biogas yield. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 316, p. 115322, 2022. 115322.

VDI. VDI 4630 - FERMENTATION OF ORGANIC MATERIALS CHARACTERISATION OF THE SUBSTRATE. SAMPLING. COLLECTION OF MATERIAL DATA. FERMENTATION TESTS. **Verein Deutscher Ingenieure**. Düsseldorf: The Association of German Engineers. Düsseldorf, 2006.

VELÁSQUEZ PIÑAS, J. A.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; ROALCABA, O. D. C. Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. **Renewable Energy**, Itajubá, v. 117, p. 447-458, 2018.

WILSON, C. A.; NOVAK, J.; TAKACS, I.; WETT, B.; MURTHY, S. The kinetics of process dependent ammonia inhibition of methanogenesis from acetic acid, **Water Research**, Amsterdam, v. 46, p. 6247-6256, 2012.

ZANATTA, D.; MARONI NETO, R. Algumas considerações sobre o planejamento tributário: uma comparação por meio de simulação entre o Simples, o Lucro Presumido e o Lucro Real. **Revista de Ciências Gerenciais**, Valinhos, v. 10, n. 2, 2015.

ZHANG, L.; JAHNG, D. Enhanced anaerobic digestion of piggery wastewater by ammonia stripping: Effects of alkali types. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 182, n.1-3, p. 536–543, 2010.

ZHOU, M.; YAN, B.; WONG, J. W. C.; ZHANG, Y. Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 248, p. 68-78, 2018.

ZUCCONI, F.; PERA, A.; FORTE, M.; BERTOLDI, M. Evaluating toxicity of immature compost. **Biocycle**, Amsterdam, v. 2, n. 22, p.54-57, 1981.

APÊNDICE

Apêndice A Demonstração dos fluxos de caixa dos projetos, nos cenários T_0 , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 .

[illegible]

[illegible]

EBITDA	-	709.119	934.169	934.169	934.169	934.169	934.169	934.169	934.169	934.169	934.169
Depreciação	-	35.908	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862
LAIR	-	673.211	880.307	880.307	880.307	880.307	880.307	880.307	880.307	880.307	880.307
IR e CSLL	-	228.892	299.304	299.304	299.304	299.304	299.304	299.304	299.304	299.304	299.304
Res. líquido	-	444.319	581.002	581.002	581.002	581.002	581.002	581.002	581.002	581.002	581.002
Depreciação	-	35.908	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862	53.862
FCO	-	480.227	634.864	634.864	634.864	634.864	634.864	634.864	634.864	634.864	634.864
Invest.	1.746.200	-	-	-	-	220.000	-	-	-	-	220.000
FCL	-1.746.200	480.227	634.864	634.864	634.864	414.864	634.864	634.864	634.864	634.864	414.864
FCD	-1.746.200	434.595	519.944	470.537	425.826	251.823	348.744	315.606	285.616	258.476	152.856
TMA 10,5%		VPL 1.717.823		IL 1,98		TIR 30,5%		Payback descontado 3,68 anos			
Cenário T ₄ – codigestão anaeróbia de água residuária da suinocultura com abóbora moranga cozida											
Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rec. bruta	-	623.196	934.794	934.794	934.794	934.794	934.794	934.794	934.794	934.794	934.794
Dedução	-	6.232	9.348	9.348	9.348	9.348	9.348	9.348	9.348	9.348	9.348
Rec. líquida	-	616.964	925.446	925.446	925.446	925.446	925.446	925.446	925.446	925.446	925.446
Custos var.	-	799.196	1.198.794	1.198.794	1.198.794	1.198.794	1.198.794	1.198.794	1.198.794	1.198.794	1.198.794
Marg. Cont.	-	-182.231	-273.347	-273.347	-273.347	-273.347	-273.347	-273.347	-273.347	-273.347	-273.347
Custos fixos	-	-330.545	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324
EBITDA	-	34.513	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770
Depreciação	-	-365.058	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094
LAIR	-										
IR e CSLL	-	-365.058	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094	-647.094
Res. líquido	-	34.513	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770	51.770
Depreciação	-	-330.545	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324
FCO	-	-330.545	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324
Invest.	1.537.000	-	-	-	-	220.000	-	-	-	-	220.000
FCL	-1.537.000	-330.545	-595.324	-595.324	-595.324	-815.324	-595.324	-595.324	-595.324	-595.324	-815.324
FCD	-1.537.000	-299.135	-487.561	-441.232	-399.305	-494.902	-327.024	-295.949	-267.828	-242.378	-300.405
TMA 10,5%		VPL -5.092.718,11		IL -		TIR -		Payback descontado -			

Rec. bruta: Receita bruta; Rec. Líquida: receita líquida; Custos var.: custos variáveis; Marg. Cont.: Margem de contribuição; EBITDA: Lucros antes de juros, impostos e depreciação; LAIR: lucro antes do imposto de renda; IR e CSLL: imposto de renda e contribuição social sobre o lucro líquido; Res. Líquido: resultado líquido; FCO: fluxo de caixa operacional; Invest.: investimento; FCL: fluxo de caixa livre; FCD: fluxo de caixa descontado; TMA: taxa mínima de atratividade; VPL: valor presente líquido; TIR: taxa interna de retorno; Payback descontado: período de retorno do projeto (anos) considerando o valor do dinheiro no tempo. Fonte: A autora (2024).