



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
Faculdade de Ciências Agrárias  
Programa de Pós-Graduação em Zootecnia



# **VIABILIDADE ECONÔMICA DE ESTRATÉGIAS DE TRATAMENTO E RECICLAGEM DOS DEJETOS DE BOVINOS LEITEIROS**

**Isabelly Alencar Macena**

Zootecnista

Dourados - MS

**2025**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
Faculdade de Ciências Agrárias  
Programa de Pós-Graduação em Zootecnia



## **Viabilidade econômica de estratégias de tratamentos e reciclagem dos dejetos de bovinos leiteiros**

**Isabelly Alencar Macena**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Carolina Amorim Orrico**

**Co-orientador: Prof. Dr. Régio Marcio Toesca Gimenes**

**Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Zootecnia**

Dourados - MS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M141v Macena, Isabelly Alencar

Viabilidade econômica de estratégias de tratamento e reciclagem dos dejetos de bovinos leiteiros [recurso eletrônico] / Isabelly Alencar Macena. -- 2025.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Dra. Ana Carolina Amorim Orrico.

Coorientador: Dr. Régio Marcio Toesca Gimenes.

Dissertação (Mestrado em Zootecnia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:  
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. biogás. 2. biomassa. 3. composto. 4. energia renovável. 5. manejo de resíduos. I. Orrico, Dra. Ana Carolina Amorim. II. Gimenes, Dr. Régio Marcio Toesca. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
Faculdade de Ciências Agrárias  
Programa de Pós-Graduação em Zootecnia



## **CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

### **Viabilidade econômica de estratégias de tratamento e reciclagem dos dejetos de bovinos leiteiros**

Isabelly Alencar Macena

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 25 de julho de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Dr. Fernando Miranda de Vargas  
Junior  
Universidade Federal da  
Grande Dourados

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Tânia Mara Baptista dos  
Santos  
Universidade Estadual de Mato  
Grosso do Sul

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Carolina Amorim Orrico  
Orientadora

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Isabelly Alencar Macena, filha de Maria Vera Lucia Alencar e Marcio Macena, nasceu em Campo Grande, no estado de Mato Grosso do Sul, no dia 20 de junho de 1999. Em 2016, concluiu o ensino médio e, em maio de 2017, ingressou no curso de graduação em Zootecnia na Universidade Federal da Grande Dourados, onde se tornou membro do grupo de pesquisa “Produção Animal Sustentável: Reciclagem dos Resíduos e Manejo de Forragens”. Permaneceu no grupo durante todo o curso e obteve o título de Zootecnista em 2022. Em 2023, iniciou o mestrado em Zootecnia, na área de concentração em Produção Animal, pela Universidade Federal da Grande Dourados, dando continuidade ao seu projeto de pesquisa em colaboração com o grupo de pesquisa que já fazia parte. Foi bolsista pela Capes durante todo o período de mestrado.

## EPÍGRAFE

*"Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças; subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão."*

**Isaías 40:31**

## DEDICATÓRIA

A minha mãe e irmã, pelo amor incondicional, pela educação e pelo apoio em todas as etapas da minha vida.

Aos meus familiares, por acreditarem em mim, mesmo nos momentos de dúvida e cansaço.

Aos meus amigos, por estarem ao meu lado e me motivarem a continuar.

As minhas gatas, mesmo causando estresse diário, faço tudo por vocês, Mel e Nina.

E a todos os que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse alcançar esta conquista.

Este é um reflexo do esforço conjunto e do carinho que recebi ao longo dessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e coragem concedidas ao longo desta caminhada. Sem a sua presença, este trabalho não teria sido possível.

A minha mãe, Maria Vera Lucia Alencar e irmã Daiane Alencar da Silva por todo o amor, apoio e incentivo incondicional. Vocês foram a base de tudo e o alicerce que me sustentou em todos os momentos.

Aos meus familiares mais próximos, por sempre acreditarem em mim e por estarem ao meu lado nos momentos de alegria e de dificuldade. Seu carinho e compreensão foram fundamentais.

A minha orientadora Dr<sup>a</sup> Ana Carolina Amorim Orrico, Dr<sup>a</sup> Erika do Carmo Ota e a Vanessa Souza por toda a paciência, orientação e por acreditarem no potencial deste trabalho. Suas valiosas contribuições e conselhos foram cruciais para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu co-orientador Dr. Régio Marcio Toesca Gimenes, agradeço pela orientação e pelo apoio, que foram fundamentais para a realização das análises necessárias. Seu conhecimento e sua constante disponibilidade foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

As minhas colegas do grupo de pesquisa: Manejo de Forragens e Resíduos Agropecuários, pelas trocas de conhecimento e experiências que enriqueceram esta jornada acadêmica.

Aos amigos, Annye Campos, Letícia Maria, Maria Ildilene, Alexander de Almeida, Debora Moraleco, Brenda Kelly Leite, Daniela Mandú, Arielle Oliveira, Fernanda Sotolani e Rita Rolim, que compartilharam risadas, momentos de tensão e que sempre estiveram prontos para oferecer uma palavra de apoio. Vocês tornaram essa trajetória mais leve e agradável.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente. Cada gesto de apoio, incentivo e compreensão foi essencial para que eu pudesse chegar até aqui.

Muito obrigado a todos.

## SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	2
2.1 Produção de dejetos pelos bovinos leiteiros e alternativas para tratamento .....	2
2.2 Viabilidade Econômica e Modelagem Financeira da Compostagem e Biodigestão Anaeróbia	5
3. OBJETIVOS .....	11
3.1 Objetivo Geral .....	11
3.2 Objetivos Específicos .....	11
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	12
CAPÍTULO 2 .....	19
1. INTRODUÇÃO .....	19
Hipótese .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
2.1 Simulação dos Diferentes Cenários.....	21
2.1.1 Caracterização do Sistema de Produção.....	21
2.1.2 Descrição dos Cenários Avaliados .....	22
2.3 Concentração de Monensina nos Dejetos .....	23
2.4 Estimativa de Produção de Fertilizantes e Bioenergia.....	23
2.5 Avaliação da Viabilidade Econômica .....	25
3. RESULTADOS.....	31
3.1 Viabilidade econômica.....	31
4. Discussão .....	37
5. CONCLUSÕES .....	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41
CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	47

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Organograma do processo com ou sem separação de frações do dejetos até a destinação do tratamento em cada cenário.....	22
<b>Figura 2.</b> Investimento inicial em cada cenário (Ano 0).....	31
<b>Figura 3.</b> Análise de sensibilidade e coeficiente de regressão do Valor Presente Líquido (VPL) obtidos por simulação de Monte Carlo, para os cenários I Comp., II D.A. 20, III D.A. 30, IV D.A. 20+Comp. e V D.A. 30+Comp.....	35 e 36

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
<b>Tabela 1</b> – Descrição dos cenários avaliados considerando os diferentes tratamentos de dejetos de bovinos leiteiros.....	23
<b>Tabela 2</b> – Parâmetros de produção de dejetos bovinos leiteiros utilizados nos cálculos econômicos.....	24
<b>Tabela 3</b> – Parâmetros operacionais obtidos nos diferentes cenários de tratamento de dejetos de bovinos leiteiros.....	24
<b>Tabela 4</b> - Concentração de nutrientes (% dos sólidos totais) nos biofertilizantes em cada cenário, conforme os tratamentos aplicados aos dejetos de bovinos leiteiros.....	25
<b>Tabela 5</b> - Investimentos fixos (US\$, dólar) necessários para implantação e instalação dos sistemas de compostagem e biodigestão anaeróbia em cada cenário produtivo.....	30
<b>Tabela 6</b> – Composição do fluxo de caixa anual (US\$), do 1º ao 15º ano após o investimento inicial, em cada cenário.....	32
<b>Tabela 7</b> - Indicadores de retorno e eficiência econômica dos cenários.....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS

- B/C** → Razão Benefício/Custo
- C.** → Compostagem
- CAPM** → Modelo de Precificação de Ativos de Capital
- D.A.** → Biodigestão Anaeróbia
- EUA** → Equivalente Uniforme Anual
- EUR** → Euro
- FC** → Fluxo de Caixa
- IBGE** → Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ITR** → Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural
- IL** → Índice de Lucratividade
- Ke** → Custo de Capital Próprio
- KvA** → quilovolt-ampère
- kWh** → quilowatt-hora
- MO** → Mão de Obra
- PBD** → Payback Descontado
- ROIC** → Retorno sobre o Capital Investido
- SMC** → Simulação de Monte Carlo
- ST** → Sólidos Totais
- TIR** → Taxa Interna de Retorno
- TMA** → Taxa Mínima de Atratividade
- TRH** → Tempo de Retenção Hidráulica
- VPL** → Valor Presente Líquido
- WACC** → Cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital

## **Viabilidade econômica de estratégias de tratamento e reciclagem dos dejetos de bovinos leiteiros**

**RESUMO** - Diante da crescente demanda por soluções sustentáveis e economicamente viáveis para o manejo de resíduos gerados na produção animal, este estudo avaliou a viabilidade econômica de estratégias de tratamento e reciclagem dos dejetos de bovinos leiteiros. Foram estudadas a compostagem e biodigestão anaeróbia em diferentes configurações operacionais, considerando os efeitos da separação de frações dos dejetos e dos tempos de retenção hidráulica (TRH) dos substratos. Foram analisados cinco cenários: compostagem dos dejetos sem a separação de frações (I), biodigestão anaeróbia sem separação de frações, com TRHs de 20 (II) e 30 dias (III), e biodigestão anaeróbia, associada à compostagem, após a separação de frações com TRHs de 20 (IV) e 30 dias (V). Considerando um rebanho de 200 animais e dados experimentais prévios, a análise econômica foi conduzida por meio de fluxos de caixa projetados para 15 anos, incluindo receitas (venda de biofertilizantes e energia) e custos (investimentos, operação e manutenção). Foram aplicados indicadores financeiros, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado, complementados por análise de sensibilidade e Simulação de Monte Carlo para avaliação de risco. Os resultados indicaram que a biodigestão anaeróbia com TRH de 30 dias e sem separação de frações (Cenário III D.A) apresentou o melhor desempenho econômico, com VPL de US\$53.407 TIR de 15,54%), sendo a alternativa mais rentável e atrativa para os produtores com poder de investimento. A compostagem sem separação de frações (Cenário I C.) também foi considerada viável (VPL = US\$9.832 TIR = 10,07%), assim como os demais cenários (II D.A20, IV D.A.20+C. e V D.A.30+C.). Conclui-se que a biodigestão anaeróbia com TRH 30 dias e sem separação de frações representou a estratégia mais vantajosa para propriedades leiteiras de produtores com alto poder de investimento, e a compostagem para pequenos produtores por aliar simplicidade operacional a baixos custos e retorno financeiro moderado.

**Palavras-chaves:** biogás, biomassa, composto, energia renovável, manejo de resíduos, metano

## **Economic viability of dairy cattle waste treatment and recycling strategies**

**ABSTRACT** – Given the growing demand for sustainable and economically viable solutions for managing waste generated in animal production, this study evaluated the economic viability of dairy cattle manure treatment and recycling strategies. Composting and anaerobic digestion were studied in different operational configurations, considering the effects of manure fraction separation and substrate hydraulic retention times (HRT). Five scenarios were analyzed: manure composting without fraction separation (I); anaerobic digestion without fraction separation with HRTs of 20 (II) and 30 days (III); and anaerobic digestion combined with composting after fraction separation with HRTs of 20 (IV) and 30 days (V). Considering a herd of 200 animals and previous experimental data, the economic analysis was conducted using projected cash flows for 15 years, including revenues (sale of biofertilizers and energy) and costs (investments, operation, and maintenance). Financial indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Discounted Payback were applied, complemented by sensitivity analysis and Monte Carlo Simulation for risk assessment. The results indicated that anaerobic digestion with a 30-day HRT and without fraction separation (Scenario III A.D.30) presented the best economic performance, with an NPV of US\$53,407 (IRR of 15.54%), making it the most profitable and attractive alternative for producers with the necessary investment power. Composting without fraction separation (Scenario I C.) was also considered viable (NPV = US\$9,832, IRR = 10.07%), as were the other scenarios (II A.D.20+C., IV A.D.20+C., and V A.D.30+C.). It is concluded that anaerobic biodigestion with 30-day TRH and without separation of fractions represented the most advantageous strategy for dairy farms of producers with high investment power, and composting for small producers, because it combines operational simplicity with low costs and moderate financial return.

**Keywords:** biogas, biomass, compost, renewable energy, waste management, methane

## **CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

### **1. INTRODUÇÃO**

A produção leiteira, diante do atual cenário de crescimento e da forte ampliação no uso de tecnologias nos sistemas de criação, tem apresentado expressivo aumento na produtividade de leite (Embrapa, 2024). Esse avanço está associado também a mudanças no perfil produtivo, com a expansão dos sistemas confinados de criação e produção, bem como o incremento no número de vacas por unidade produtiva. No entanto, esse avanço na produtividade está relacionado diretamente à maior geração de resíduos produzidos pelos animais que, quando não são adequadamente manejados, podem resultar em problemas ambientais.

É frequente o uso de monensina na alimentação dos animais ruminantes, em virtude dos seus efeitos benéficos sobre o processo digestivo e colabora no controle de *Eimeria*. A sua ação consiste na inibição de bactérias gram-positivas produtoras de ácidos acético e butílico e favorecimento de bactérias gram-negativas, que produzem ácido propiônico, aumentando sua concentração no rúmen e reduzindo perdas energéticas (Andrighetto et al, 2002; Van Soest, 1994). Além da modificação nos ácidos graxos voláteis, a monensina melhora a eficiência alimentar por meio de outros mecanismos, como alteração na digestibilidade, no consumo e na produção de gases (Schelling, 1984), através dessa melhor eficiência se obtém também a redução nas quantidades de dejetos que são excretados pelos animais (Costa et al., 2018).

Esses resíduos, embora excretados em menor quantidade, apresentam alta concentração em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio. Quando manejados adequadamente, esses nutrientes podem ser reaproveitados, por meio de processos de tratamento e reciclagem, resultando nos adubos orgânicos, e na geração de energia. Assim, essas formas de tratamento e reciclagem dos dejetos caracterizam uma valiosa oportunidade, pois além de oferecerem um destino adequado, proporcionam retorno financeiro ao produtor (Marañón et al., 2011).

Entre as alternativas de tratamento e reciclagem mais utilizadas destacam-se a biodigestão anaeróbia e a compostagem. A separação das frações sólida e líquida dos resíduos pode otimizar o aproveitamento, permitindo que cada fração seja direcionada ao tratamento mais apropriado (Grell et al., 2024; Orrico Junior et al.,

2012). Ambas as formas de tratamento apresentam potencial para agregar valor ao resíduo tratado, seja pela substituição do fertilizante químico pelo adubo orgânico produzido ou pela geração de energia elétrica.

Para escolher entre os sistemas de tratamento, ou até mesmo o uso integrado dessas tecnologias, deve-se considerar não apenas os aspectos técnicos, mas também os fatores econômicos, como custo de implantação, manutenção e retorno sobre o investimento inicial. Para isso, realiza-se a análise de viabilidade econômica, que irá orientar a escolha da alternativa mais adequada à realidade do produtor rural, com base tanto no retorno financeiro quanto no investimento inicial necessário para a implantação do sistema (Sharara et al., 2020).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Produção de dejetos pelos bovinos leiteiros e alternativas para tratamento**

A cadeia produtiva do leite é considerada uma das mais relevantes do agronegócio brasileiro, com destaque em todo o território nacional por desempenhar um importante papel econômico e social. A atividade apresenta constantes taxas de crescimento na produção, exportação e consumo. Observa-se como característica principal no desenvolvimento da atividade, a diversidade nos sistemas de produção de leite (Teixeira, 2018; Rocha et al., 2018).

No Brasil, a produção de leite alcançou a marca de 35 bilhões de litros de leite no ano de 2023 (EMBRAPA, 2025), o que consagrou o país como o 3º maior produtor de leite do mundo. Esse aumento na produção, embora seja importante para a economia do país, traz consigo desafios ambientais, sobretudo em relação ao adequado manejo dos dejetos gerados pelos animais e à destinação correta.

De acordo com o censo realizado pelo IBGE (2023) o Brasil possui um dos maiores rebanhos de bovinos do mundo, sendo uma parte formada por vacas leiteiras. Nesse contexto, a gestão dos dejetos oriundos da bovinocultura de leiteira adquire relevância estratégica, uma vez que práticas inadequadas podem resultar em aumento dos impactos ambientais devido as elevadas quantidades de nutrientes contidas nos dejetos, e a frequente presença de resíduos de antibióticos que podem

ser excretados pelos animais, elevam-se as preocupações quanto a correta forma de tratamento e destinação destes resíduos.

Diante desse cenário, é necessário que haja a adoção de gerenciamento desses dejetos de forma consciente como o objetivo de mitigar os riscos ambientais através do tratamento para posteriormente ser utilizado no solo como fertilizante (Valente et al., 2016), ou fonte de energia, na forma de biogás. Dentre das possíveis opções que podem ser utilizadas como via de tratamento tem-se destaque para a biodigestão anaeróbia e compostagem, que são processos biológicos com microrganismos que degradam a matéria orgânica, promovendo a reciclagem dos nutrientes e gerando como produtos o biogás e o fertilizante orgânico, que representam agregação de valor à atividade de produção animal (Hadin et al., 2016).

A compostagem ocorre por meio da degradação da matéria orgânica em ambiente aeróbio, podendo ser dividida em duas fases que são denominadas de estabilização e maturação, assim tendo como resultado do processo um composto orgânico rico em nutrientes, com capacidade de melhoria na fertilidade do solo, nutrição das plantas e redução de patógenos (Epstein, 2011; Chiarello et al., 2018; Pergola et al., 2018). Além disso, esse processo oferece inúmeras vantagens para o produtor, por ter um baixo custo de implantação e manutenção, tornando-o economicamente viável, com a redução de massa e volume dos dejetos, evitando a formação de odores, e pode ser feito em qualquer época do ano (Otenio et al., 2010).

Já a biodigestão anaeróbia é o processo de degradação do material orgânico, por meio do processo fermentativo e oxidativo sob a ausência de oxigênio que se difunde como uma alternativa de tratamento dos dejetos por reduzir a capacidade poluente, gerar a produção do biofertilizante, utilizado como insumo agrícola de baixo custo, e da energia, representando economia no meio rural (Fukuda, 2013; Kaufmann, 2015; Neshat et al., 2017; Scarlat et al., 2018). Desse modo, o aproveitamento dos produtos: biofertilizante e biogás proporciona valor econômico para as diversas cadeias do agronegócio, de pequeno a grande porte, devido à menor dependência dos fertilizantes minerais e ao aumento da autossuficiência energética (Montoro et al., 2019).

Um dos fatores que pode influenciar nos processos de tratamento é a presença de antibióticos oriundos da dieta dos animais, sendo a monensina um dos mais

comumente utilizados, com ação sobre a redução das emissões de metano entérico e diminuição da geração de resíduos, visto que melhora a conversão alimentar e assim leva ao maior aproveitamento do alimento pelo animal (Diepersloot et al., 2024).

Como o animal não consegue absorver completamente a monensina ofertada, uma parte será excretada nas fezes, e a sua presença levará à alteração da composição dos dejetos, podendo afetar negativamente a microbiota que estará presente na biodigestão anaeróbia e na compostagem (Arikan et al., 2018). Em um estudo conduzido com a os dejetos de bovinos recebendo monensina como aditivo, foi observado que a monensina nos dejetos pode levar ao aumento dos teores de lignina e fibras nos resíduos que são importantes para degradação da matéria orgânica (Leite et al., 2024)

Entre as alternativas que podem promover melhorias para as condições de degradação dos substratos durante a biodigestão anaeróbia ou compostagem, a separação das frações sólida e líquida se destaca como uma modalidade simples de ser executada e de baixo custo. Essa técnica consiste em separar o dejetos *in natura* que na sólida se concentra a maior parte dos constituintes fibrosos como celulose, hemicelulose e lignina, matéria orgânica mais resistente a digestão e nutrientes de menor solubilidade. Já na fração líquida se concentram os constituintes mais disponíveis para a degradação, que são os compostos orgânicos solúveis, nitrogênio amoniacal altamente solúvel e íons minerais. Assim, após a separação mecânica destas frações, haverá o direcionamento da fração sólida para compostagem e a líquida para biodigestão anaeróbia (Møller et al., 2004; Hjorth et al., 2010; Grell et al., 2024).

Entretanto, no processo de biodigestão anaeróbia, a eficiência do processo não é exclusivamente a partir do substrato que é adicionado no biodigestor ou até mesmo da separação das frações; um outro parâmetro muito importante a ser considerado é o tempo de retenção hidráulica (TRH), que corresponde ao período médio que o substrato permanece dentro do biodigestor. Esse fator tem relação direta com o volume gerado de biogás e a estabilidade do biofertilizante gerado por determinar o tempo que o meio microbiano presente no biodigestor terá para agir no substrato (Nunes, 2017; Lima et al., 2020).

Então uma combinação entre biodigestão anaeróbia e compostagem se torna uma maneira de otimização dos benefícios ao manejar os dejetos, permitindo assim a reciclagem deles, obtendo-se como produto a produção de biogás e fertilizantes orgânicos e ainda tendo o fator de se evitar possíveis impactos ambientais indesejados. Essa abordagem integrada promove a sustentabilidade na produção leiteira e se alinha ao princípio de economia circular, ao promover o reaproveitamento dos nutrientes presentes nos dejetos, a transformação em diferentes produtos levando a redução do desperdício (Enokida et al., 2025).

Assim, para se escolher a forma de tratamento devem ser levados em consideração diversos fatores como: técnico e operacional, a utilização ou não da separação das frações, o tempo de retenção hidráulica no caso da biodigestão anaeróbia e as características do substrato, que podem ser influenciados pelo uso da monensina.

## **2.2 Viabilidade Econômica e Modelagem Financeira da Compostagem e Biodigestão Anaeróbia**

A viabilidade econômica é a capacidade de um investimento, projeto ou empreendimento de gerar retorno financeiro positivo, considerando a receita e as despesas, sendo de suma importância para embasar decisões e otimizar recursos. Para esse tipo de estudo são utilizados indicadores financeiros como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback Descontado (PBD) (Marquezan et al., 2006; Tan et al., 2022; Zhang & Wu, 2023).

O Valor Presente Líquido (VPL) consiste no somatório dos fluxos de caixa descontados subtraindo-se o valor do investimento, incluindo no cálculo o custo de capital e os custos inerentes ao risco. Um investimento é considerado viável quando apresentar VPL maior que zero (Assaf Neto, 2011; Bruni e Famá, 2003). A fórmula do VPL é demonstrada na equação 1:

$$(1) \quad VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC}{(1+i)^j} - I_{Inicial}$$

Onde:

FC: Fluxo de caixa;

i: Taxa de desconto;

n: Número de períodos do fluxo;

I Inicial: Investimento inicial;

J: Período genérico.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) representa o mínimo que o investidor busca obter ao alocar seus recursos ou o máximo que uma empresa está disposta a pagar ao buscar financiamento. Para que o projeto seja considerado viável a TIR deve ser superior à TMA (Brealey et al., 2013).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de juros que produz um VPL igual a zero, ou seja, é a taxa que iguala os fluxos de caixa futuros com o investimento inicial (Helfert, 2020). Ao assumir que a taxa de desconto é equivalente a taxa de juros, os fluxos de caixa intermediários são reinvestidos na própria TIR calculada ao investimento (Hoji, 2006). A fórmula do TIR é demonstrada na equação 2:

$$(2) \quad TIR = \sum_{k=0}^n \frac{E(CF_k)}{(1 + TIR)^{k+j}} = 0$$

Onde:

E: Valor esperado;

CF<sub>k</sub>: Valor genérico do fluxo de caixa líquido no período k;

TIR: Taxa interna de retorno;

K: Período no instante K do fluxo de caixa;

j: Posição do vetor (início de período = 0; meio = 0,5; fim = 1);

n: Número de períodos do fluxo;

O PBD mede o tempo necessário para recuperar o investimento inicial, devendo ser utilizado como ferramenta auxiliar de análise de investimentos (Assaf Neto, 2014, Motta & Callôba, 2002; Casarotto Filho & Kopittke, 2007), devendo ser menor do que o tempo estipulado do projeto. Esse indicador utiliza uma taxa de desconto para calcular o número exato de períodos, evitando distorções no tempo de

retorno. Diferente do payback simples, ele considera que o valor investido varia ao longo do tempo, incorporando ajustes monetários, desvalorização da moeda etc. (Gitman, 2002).

O Modelo de Precificação de Ativos de Capital (CAPM) estabelece que o retorno esperado de um ativo depende de uma função linear do ativo livre de risco, do risco sistemático do ativo beta ( $\beta$ ) e do prêmio de risco da carteira de mercado. O beta é um indicador de volatilidade que relaciona o retorno do ativo ou segmento em relação ao mercado como um todo, podendo ser obtido por meio de uma regressão linear comparando a variação do mercado com a do segmento ou ativo analisado (Gitman et al., 2010; Crundwell, 2008). O valor do beta indica o risco do segmento em relação ao mercado: valores acima de 1 refletem maior risco; abaixo de 1 indicam menor risco; e igual a 1 representam risco igual.

Outros indicadores financeiros são o Índice de Lucratividade (IL), a relação Benefício/Custo (B/C) e o Equivalente Uniforme Anual (EUA). O IL demonstra a relação entre o lucro operacional e a receita bruta, em porcentagem. É uma medida importante de rentabilidade, pois mostra a taxa disponível de receita após o pagamento de todos os custos operacionais que compõem o sistema de produção (Tsunechiro et al., 2006). É expresso pela equação 3:

$$(3) \quad IL = (LO / RB) * 100$$

Onde:

LO: Lucro operacional;

RB: Receita bruta.

A Benefício/Custo (B/C) é a relação entre as receitas e as despesas que permite obter o retorno do capital a cada unidade monetária investida, descontando o valor do dinheiro no tempo a uma taxa de desconto fixada (Lanna & Reis, 2012). Se a razão B/C for maior que 1 o projeto é viável; resultado igual a 1 são considerados de risco, porém ainda realizáveis; razão B/C menor que 1 o projeto é inviável e de alto risco (Rosa et al., 2018). É calculada pela equação 4:

$$(4) \quad B/C = \sum_{t=0}^n \frac{R_t / (1+k)^t}{C_t / (1+k)^t}$$

Onde:

R: receitas;

C: custos e investimentos no projeto;

t: período;

n: horizonte do investimento; e

k: taxa de desconto.

O Equivalente Uniforme Anual (EUA) consiste em uma série uniforme anual equivalente ao fluxo de caixa do investimento, considerando a TMA, ou seja, verifica-se se essa série uniforme é suficiente para cobrir todos os custos e receitas do projeto. O EUA permite avaliar se o projeto é economicamente viável e, caso haja mais de uma alternativa, identificar qual delas oferece o melhor resultado financeiro (Casarotto Filho e Kopittke, 2010). Sua fórmula de cálculo se expressa na Equação 5.

$$(5) \quad VAUE = VPL \times \left[ \frac{i \times (1 + Taxa\ Minima\ de\ Retorno)^N}{(1 + f)^n - 1} \right]$$

Onde,

VAUE: valor uniforme equivalente

VPL: valor presente líquido

i: taxa de desconto ou taxa de juros

N: número de períodos (geralmente anos)

f: taxa de crescimento ou inflação

n: número de períodos de capitalização

Em situações em que se tem um grau de incerteza, é de extrema importância que sejam incorporadas ferramentas que ajudem a analisar os riscos, como a análise de sensibilidade e a Simulação de Monte Carlo (SMC), ambas essenciais para a mensuração das incertezas previamente identificadas (Ávila, 2012).

A análise de sensibilidade permite identificar quais variáveis exercem maior influência no fluxo de caixa, possibilitando concentrar esforços e recursos para tentar diminuir as incertezas delas. Porém, a análise de sensibilidade considera a variação de apenas uma variável por simulação. A Simulação de Monte Carlo, por outro lado,

permite considerar mais de uma variável (Samanez, 2007), as quais podem estar interligadas, de modo que variações em uma podem influenciar diretamente em outra(s). Além disso, a SMC permite identificar o cenário mais pessimista e o mais otimista, possibilitando compreender melhor os limites financeiros do projeto (Pereira, 2010). São estabelecidos limites superiores e inferiores, permitindo determinar quais variáveis podem inviabilizar o projeto (Pierozan Júnior et al., 2018).

O tratamento de dejetos de bovinos pode ser uma atividade lucrativa para os produtores rurais; entretanto, a sua viabilidade econômica depende de diversos fatores, incluindo a escolha da tecnologia (Guares et al., 2021), a escala da propriedade (Tufaner & Avsar, 2019), a otimização da cadeia de suprimentos (Ahmed et al., 2025) e os subsídios financeiros (Astill & Shumway, 2016). Um dos desafios para o tratamento por biodigestão anaeróbia é o alto investimento inicial em infraestrutura, que inclui usinas de biogás, biodigestores e unidades de cogeração, o que pode representar um obstáculo para pequenos e médios produtores (Fiorese et al., 2023). Apesar do elevado custo da adoção dessa tecnologia, de acordo com Mazurkiewicz (2023), a produção de metano a partir de dejetos de vaca e co-substratos disponíveis na própria fazenda pode proporcionar a uma pequena fazenda leiteira (140 vacas) benefícios financeiros de até EUR 114.159 por ano. Nas propriedades com confinamento de bovinos leiteiros, o aproveitamento energético influencia diretamente na receita obtida, o que reforça a importância de técnicas que potencializem o rendimento de biogás e metano. A separação da fração sólida da fração líquida dos dejetos de bovinos é uma técnica comumente aplicada com o objetivo de melhorar o desempenho da biodigestão anaeróbia dos dejetos de bovinos. Sem essa separação, o alto teor de sólidos totais (40-50%) e a composição fibrosa podem reduzir significativamente o potencial de geração de biogás (Imeni et al., 2020; Zulkifli et al., 2015; Marañón et al., 2012; Angelidaki et al., 2005), o que pode impactar nos indicadores econômicos.

De acordo com Mendonça, Otenio e Paula (2021), apenas a produção de energia elétrica gerada a partir do biogás foi suficiente para garantir o funcionamento do sistema de biodigestão, sem considerar os ganhos com a comercialização de biofertilizante. Por outro lado, a venda de biofertilizante e a economia gerada pela substituição de fertilizantes químicos que pode melhorar o solo e diminuir o tempo de

payback (Motta et al., 2009);

A compostagem tem se mostrado uma alternativa economicamente mais acessível para pequenas e médias propriedades, devido ao menor custo de investimento inicial em comparação com a biodigestão (Castellani et al., 2024). Além da redução dos gastos com fertilizantes sintéticos, a comercialização do fertilizante orgânico produzido na própria fazenda pode contribuir para a sustentabilidade financeira da propriedade (Palese et al., 2020), além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e promover a reciclagem de nutrientes no solo (Castellani et al., 2024; Palese et al., 2020). A viabilidade econômica da compostagem tem se mostrado favorável, especialmente quando associada ao aproveitamento de estruturas e equipamentos já existentes nas fazendas. De acordo com Palese et al. (2020), o uso de plataformas de concreto e tratores, por exemplo, permitiu reduzir os custos adicionais para a implantação do sistema.

Apesar da compostagem exigir um capital de investimento inicial mais baixo, sua capacidade de geração de receita tende a ser inferior à da biodigestão, pois o valor de mercado do composto orgânico geralmente é mais baixo do que o do biogás. No entanto, quando aplicada em escalas menores, a compostagem ainda pode ser economicamente viável, especialmente em unidades com capacidade inferior a 20.000 toneladas de resíduos ao ano, particularmente quando aplicada a resíduos orgânicos como esterco animal, lodo de esgoto e resíduos alimentares (Lin et al., 2018).

Resultados positivos também foram observados por Valverde-Orozco et al. (2024), destacaram que o valor agregado do composto superou o investimento adicional necessário para sua implantação, indicando a viabilidade econômica da compostagem, com recuperação de calor e uso agrícola.

Por outro lado, Fan et al. (2016) apontam que a ausência de um mercado estruturado e de normas de qualidade bem definidas para o composto comprometem a sua aceitação e dificultam a comercialização, limitando sua competitividade em relação aos fertilizantes químicos. Ao avaliarem diferentes cenários de compostagem, os autores observaram que a adoção de técnicas de segregação de resíduos na origem e otimização dos parâmetros de qualidade pode reduzir os custos de análise do composto em até 84%, tornando o processo mais atrativo financeiramente.

A adoção da técnica de separação de frações no manejo de dejetos, ao otimizar o aproveitamento desses resíduos, pode impactar diretamente nos indicadores econômicos relacionados ao investimento no tratamento. Em um estudo realizado por Nolan et al. (2012), a digestão anaeróbica de esterco de suíno com silagem de capim mostrou-se inviável economicamente, com custos de EUR 5,2 por m<sup>3</sup> de esterco. A separação sólido-líquido do digestato e o tratamento das frações por compostagem e biodigestores construídos adicionariam mais aos custos do tratamento, tornando as tecnologias investigadas não rentáveis naquele cenário.

Dessa forma, observa-se que tanto a biodigestão anaeróbia quanto a compostagem se destacam como forma de tratamento de dejetos, com benefícios econômicos. No entanto, existem lacunas, especialmente em relação à avaliação da viabilidade econômica considerando diferentes aspectos de manejo e operacionais, como a separação de frações e o tempo de retenção hidráulica.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a viabilidade econômica da biodigestão anaeróbia e/ou da compostagem, quando aplicadas de forma integrada ao tratamento de dejetos de bovinos leiteiros, buscando identificar quais formas de tratamento se mostram mais vantajosas sob a ótica técnica e econômica, considerando as particularidades do sistema de produção leiteira.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

Comparar os custos e benefícios econômicos dos cenários simulados de tratamento de dejetos, variando o tipo de tecnologia (biodigestão e/ou compostagem), a separação de frações e o tempo de retenção hidráulica;

Identificar a alternativa mais vantajosa sob a perspectiva financeira.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andriguetto J.M., Perly L., Minardi I., Gemael A., Flemming J.S., Souza G.A. de, Bona Filho A. (2002). **Nutrição Animal**. São Paulo: Editora Nobel. 327 p.

Angelidaki I., Boe K., Ellegaard L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of fullscale biogas plants. **Water Science and Technology** 52:189-194. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0516>.

Arikan O.A., Mulbry W., Rice C., Lansing S. (2018). The fate and effect of monensin during anaerobic digestion of dairy manure under mesophilic conditions. **PLoS ONE** 13:e0192080. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192080>.

Assaf Neto A. (2014). **Finanças Corporativas e Valor**. São Paulo: Atlas. 560 p.

Ávila A.V. (2013). **Matemática financeira e engenharia econômica**. 297 p. Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil - UFSC, Florianópolis.

Brealey R.A., Myers S.C., Allen F. **Princípios de Finanças Corporativas**. (2013). Porto Alegre: AMGH. 904 p.

Bruni A.L., Famá R. **As decisões de Investimentos**. (2003). São Paulo: Atlas. 257 p.

Casarotto Filho N., Kopittke B.H. (2007). **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. São Paulo: Atlas. 468 p.

Castellani P., Ferronato N., Barbieri J., Torretta V. (2024). Anaerobic digestion or composting? Small-scale plants design and holistic evaluations in a Sub-Saharan African context. **Environmental Development** 51:101008.

Chiarelto M., Damaceno F.M., Bofinger J., Restrepo J.C.P.S., Bordim Júnior G., Lorin H.E.F., Santos L.M. dos, Costa M.S.S. de M., Costa L.A. de M. (2018). Análise de ftir na determinação da qualidade de compostos orgânicos obtidos por processo de compostagem. In: 9º FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Anais...** Porto Alegre: Instituto Venturi para Estudos Ambientais, p. 1-11.

Costa L.F.X., Oliveira I.L. da S., Rodrigues L.G.S., Resende V.C. de S., Costa R.X. (2018). Viabilidade da utilização da monensina sódica na alimentação de ruminantes: revisão de literatura. **Nutritime Revista Eletrônica** 15:8115-8121.

Crundwell F.K. (2008). **Finance for Engineers: evaluation and funding of capital projects**. London: Springer-Verlag London Limited. 622 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-033-9>.

Diepersloot E.C., Pupo M.R., Heinzen Jr. C., Souza M.S., Ferraretto L.F. (2025). Effects of monensin and essential oil blend supplementation on lactation performance and feeding behavior in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Madison, 108:2517-2526. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25834>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Anuário Leite 2025: Produção de leite e mudanças climáticas**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2025. Edição digital. Disponível em: <https://www.embrapa.br/gado-de-leite>.

EMBRAPA: Embrapa Gado de Leite. **Anuário Leite – Avaliação Genética Multirracial**. (2024). Juiz de Fora: EMBRAPA.140 p.

Epstein E. **Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management**. (2011). Boca Raton: CRC Press. 340 p. <https://doi.org/10.1201/b10726>.

Fiorese E., Vaz C. R., Ricci M.R., Borges C.P. (2023). Análise econômica de tempo de retorno de uma planta produtora de biogás em aviários de médio porte. In: XXV ENGEMA. **Resumos...** São Paulo: FEA/USP, p. 1-15.

Fukuda, J. C. (2013). **Projeto de instalação de um biodigestor de baixo custo na sede de uma unidade de conservação**. 51 f. Monografia (Especialista, Pós-Graduação em Formas Alternativas de Energia) - UFLA, Lavras.

Garlipp F., Hessel E.F., Weghe H.F.A.V.D. (2011). Characteristics of gas generation (NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) from horse manure added to different bedding materials used in deep litter bedding systems. **Journal of Equine Veterinary Science** 31:383-395. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2011.01.007>.

Gitman L.J. **Princípios de administração financeira**. (2010). São Paulo: Pearson

Prentice Hall. 754 p.

Grell T., Harris P.W., Marchuk S., Jenkins S., McCabe B.K., Tait S. (2024). Biochemical methane potential of dairy manure residues and separated fractions: An Australia-wide study of the impact of production and cleaning systems. **Bioresource Technology** 391:129903. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129903>.

Hadin Å., Eriksson O., Hillman K. (2016). A review of potential critical factors in horse keeping for anaerobic digestion of horse manure. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 65:432-442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.058>.

Helfert E.A. **Técnicas de análise financeira**. (2000). Porto alegre: Bookman. 411 p.

Hjorth M., Christensen K.V., Christensen M. L., Sommer S. G. (2010). Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. **Advances in Agronomy**, 105, 1-67.

Hoji M. **Administração Financeira: uma abordagem prática**. (2006). São Paulo: ATLAS. 525 p.

Imeni S.M., Puy N., Ovejero J., Busquets A.M., Bartroli J., Pelaz L., Ponsá S., Colón J. (2020). Techno-economic assessment of anaerobic co-digestion of cattle manure and wheat straw (raw and pre-treated) at small to medium dairy cattle farms. **Waste Biomass Valorization** 11:4035-4051. <http://dx.doi:10.1007/s12649-019-00728-4>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção agropecuária: bovinos** (2023). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção agropecuária: leite**. (2023) Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>.

Kaufmann T. (2015). Sustainable livestock production: Low emission farm: the innovative combination of nutrient, emission and waste management with special emphasis on Chinese pig production. **Animal Nutrition** 1:104-112. <http://dx.doi:10.1016/j.aninu.2015.08.001>.

Lanna G.B.M., Reis R.P. (2012). Influência da mecanização da colheita na viabilidade econômico-financeira da cafeicultura no sul de Minas Gerais. **Coffee Science** 7:110-121.

Leite, B. K. V. (2024). **Influência da monensina na dieta de bovinos sobre as características dos dejetos e alternativas de minimizar os impactos no tratamento dos resíduos**. 90 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – UFGD, Dourados, MS.

Leite, B. K. V., Orrico, A. C. A., Orrico Junior, M. A. P., Aspilcueta Borquis, R. R., Costa, E. C. P. da, Menezes, I. S. de, Oliveira, J. D. de, Macena, I. A. (2024). Effect of Monensin Supplementation in the Bovine Diet on the Composition and Anaerobic Digestion of Manure with and without Screening. **Fermentation**, v.10, n.9, p. 474.

Marañón E., Castrillón L., Quiroga G., Fernández-Nava Y., Gómez L., García M.M. (2012). Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. **Waste Management** 32:1821-1825. <http://dx.doi.org:10.1016/j.wasman.2012.05.033>.

Marañón E., Salter A.M., Castrillón L., Heaven S., Fernández-Nava Y. (2011). Reducing the environmental impact of methane emissions from dairy farms by anaerobic digestion of cattle waste. **Waste Management** 31:1745-1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.015>.

Marquezan L.H.F., Brondani G. (2006). Análise de investimentos. **Revista Eletrônica de Contabilidade** 3:1-15. <https://doi.org/10.5902/198109466137>.

Mazurkiewicz J. (2023). The Impact of Manure Use for Energy Purposes on the Economic Balance of a Dairy Farm. **Energies** 16:6735. <https://doi.org/10.3390/en16186735>.

Mendonça H.V. de Otenio M.H., Paula V.R de. (2021). Digestão anaeróbica para produção de energia renovável. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente** 14:e7667.

MØller H. B., Sommer S. G., Ahring B. K. (2004). Methane productivity of manure,

straw and solid fractions of manure. **Biomass and Bioenergy**, 26(5), 485-495.

Montoro S.B., Lucas Jr J., Santos D.F.L., Costa M.S.S.M. (2019). Anaerobic co-digestion of sweet potato and dairy cattle manure: A technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production. **Journal of Cleaner Production** 226:1082-1091. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.148>.

Motta R da R., Calôba G.M. (2002). **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais**. São Paulo: Atlas. 391 p.

Motta R. da R., Gonçalves A., Neves, C. das Calôba G.M., Nakagawa M., Costa R.P. da. **Engenharia econômica e finanças**. (2009). Rio de Janeiro: Elsevier. 311 p.

Neshat S.A., Mohammadi M., Najafpour G.D., Lahijani P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 79:308-322. <http://dx.doi:10.1016/j.rser.2017.05.137>.

Nolan T., Troy S.M., Gilkinson S., Frost P., Xie S., Zhan X., Harrington C., Healy M.G., Lawlor P.G. (2012). Economic analyses of pig manure treatment options in Ireland. **Bioresource Technology** 105:15-23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.043>.

Nunes A.P. (2017). **Análise da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de biogás de suinocultura**. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro de Energia) – UFSC, Araranguá.

Orrico Junior M.A.P., Orrico A.C.A., Lucas Junior J. de, Sampaio A.A.M., Fernandes A.R.M., Oliveira E.A de. (2012). Compostagem dos dejetos da bovinocultura de corte: influência do período, do genótipo e da dieta. **Revista Brasileira de Zootecnia** 41:1301-1307, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000500030>.

Otenio M.H., Cunha C.M. da, Rocha B.B. (2010) **Compostagem de carcaças de grandes animais**: EMBRAPA Gado de Leite. Juiz de Fora, 4 p. (Comunicado técnico, 61).

Palese A.M., Persiani A., D'Adamo C., Pergola, M., Pastore V., Sileo R., Ippolito G.,

Lombardi M.A., Celano G. (2020). Composting as Manure Disposal Strategy in Small/Medium-Size Livestock Farms: Some Demonstrations with Operative Indications. **Sustainability** 12:3315. <https://doi.org/10.3390/su12083315>.

Parvage M.M., Ulén B., Kirchmann H. (2015). Are horse paddocks threatening water quality through excess loading of nutrients? **Journal of Environmental Management** 147:306-313. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.019>.

Pereira J. dos S. (2010). **Contribuição da análise de sensibilidade e da simulação de Monte Carlo na análise de viabilidade financeira de projetos**. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro de Produção) - UFJF, Juiz de Fora.

Pierozan Júnior C., Alonso M.P., Cortese D., Pierozan C.R., Walter J.B., Cortese D. (2018). Viabilidade econômica da produção de *Khaya ivorensis* em pequena propriedade no Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira** 38:1-9. <http://dx.doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201701495>.

Rosa D.G., Silva A.C. da, Araújo M. da S., Peixoto N. (2019). Estudo econômico para implantação do cultivo de maracujá-amarelo. **Revista Agrotecnologia** 10:40-53. <https://dx.doi.org/10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v10n1p40-53>.

Samanez C.P. **Gestão de Investimentos e Geração de Valor**. (2007). São Paulo: Prentice Hall. 383 p.

Scarlat N., Dallemand J-F., Fahl F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy** 129:457-472. <http://dx.doi:10.1016/j.renene.2018.03.006>.

Schelling G.T. (1984). Monensin mode of action in the rumen. **Journal of Animal Science** 58:1518-1527. <https://doi.org/10.2527/jas1984.5861518x>.

Sharara M.A., Owusu-Twum M.Y., Runge T.M., Larson R. (2020). Planning methodology for anaerobic digestion systems on animal production facilities under uncertainty. **Waste Management** 104:262-269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.028>.

Teixeira C. T. (2018). **A influência das capacidades dinâmicas de inovação de serviço no desempenho de startups brasileiras**. 126 f. Dissertação (Mestrado em administração) - UFSM, Santa Maria.

Tsunechiro A., Oliveira M.D.M., Furlaneto F. de P.B., Duarte A.P. (2006). Análise técnica e econômica de sistemas de produção de milho safrinha, região do médio Paranapanema, estado de São Paulo. **Informações Econômicas** 36:62-70.

Valente B.S., Xavier E.G., Lopes M., Pereira H. da S., Roll V.F.B. (2016). Compostagem e vermicompostagem de dejetos líquidos de bovinos leiteiros e cama aviária. **Archivos de Zootecnia** 65:79-88.

Valverde-Orozco V., Gavilanes-Terán I., Idrovo-Novillo J., Ramos-Romero S., Valverde-Quiroz D., Idrovo-Gavilanes J., Paredes C. (2024). Approach to the Circular Economy through Agro-livestock Waste Composting with Heat Recovery and Agricultural Use of the Resulting Compost. **Sustainable Chemistry and Pharmacy** 41:101730. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101730>.

Van Soest, P.J. **Nutritional ecology of ruminants**. (1994). Ithaca: Cornell University Press. 476 p.

Zulkifli Z., Ismail S., Zahari M.S.M., Umor N.A., Aziz N.I.A. (2015). Screening on biogas optimization of lignocellulose-based materials using the enzymatic hydrolysis process. **Chemical Engineering Transactions** 45:1585-1590. <http://dx.doi10.3303/CET1545265>.

## CAPÍTULO 2

### **Viabilidade econômica da separação sólido-líquido e do tempo de retenção hidráulica em sistemas de compostagem ou biodigestão para reciclagem de dejetos de gado leiteiro**

Isabelly Alencar Macena<sup>1</sup>, Ana Carolina Amorim Orrico<sup>1</sup>, Erika do Carmo Ota<sup>1</sup>, Régio Marcio Toesca Gimenes<sup>2</sup>, Vanessa Souza<sup>3</sup>, Fernando Miranda de Vargas Junior<sup>1</sup>, Brenda Kelly Viana Leite<sup>4</sup>, Marco Antônio Previdelli Orrico Junior<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Grande Dourados (UFGD), Dourados 79.804-970, Brasil

<sup>2</sup> Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados 79.804-970, Brasil

<sup>3</sup> Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande 79.070-900, Brasil

<sup>4</sup> Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul (UEMS), Aquidauana 79.200-000, Brasil

## 1. INTRODUÇÃO

A produção animal enfrenta desafios constantes para equilibrar produtividade, sustentabilidade e rentabilidade. Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Observatório do Clima, 2024), o manejo de dejetos animais foi responsável por aproximadamente 6% das emissões diretas da agropecuária brasileira em 2022, evidenciando a necessidade de integrar estratégias de mitigação às práticas produtivas. Nesse contexto. Além dos desafios relacionados à nutrição, o manejo e o tratamento adequados dos dejetos gerados são essenciais para minimizar os impactos ambientais e, ao mesmo tempo, agregar valor aos resíduos. Entre as estratégias disponíveis, destaca-se a separação de frações dos dejetos, que permite otimizar o aproveitamento dos nutrientes contidos nesses resíduos, direcionando-os para tratamentos específicos, como a biodigestão anaeróbia e a compostagem. Esses processos possibilitam a valorização dos dejetos na forma de biofertilizantes e energia renovável (Grell et al., 2024).

A separação das frações também influencia na distribuição de compostos presentes nos dejetos, como a monensina. Esse antibiótico apresenta alta afinidade pela matéria orgânica particulada, o que resulta em sua concentração predominante na fração sólida após a separação (Leite et al., 2024), enquanto sua presença na

fração líquida é reduzida. No entanto, mesmo em concentrações mais baixas, a monensina continua exercendo efeitos sobre a microbiota, promovendo uma seleção microbiana. Esse efeito pode levar à redução da população de bactérias metanogênicas, comprometendo a eficiência da biodigestão anaeróbia e, conseqüentemente, reduzindo a produção de biogás.

A adoção de estratégias de manejo de resíduos assume particular relevância no contexto da pecuária leiteira, uma vez que representa uma atividade agropecuária de grande importância econômica. No Brasil, com uma produção anual de 35,4 bilhões de litros de leite, o setor envolve inúmeras propriedades rurais, abrangendo diferentes portes e perfis produtivos (IBGE, 2022). No entanto, a intensificação da produção está associada à geração expressiva de resíduos orgânicos. Estima-se que cada bovino leiteiro possa produzir entre 40 e 60 kg de dejetos (fezes e urina) por dia, o que impõe desafios significativos para o manejo adequado desses resíduos nas unidades produtivas (Oliveira et al., 2024; EMBRAPA, 2019).

Diante desse cenário, a compostagem e a biodigestão anaeróbia destacam-se como alternativas promissoras para o tratamento dos dejetos, contribuindo não apenas para a redução dos impactos ambientais, mas também para a geração de receitas adicionais aos produtores, seja por meio da comercialização de biofertilizantes ou da produção de energia elétrica a partir do biogás (Sgroi et al., 2021). No entanto, a viabilidade econômica dessas tecnologias ainda representa um fator limitante à sua adoção, estando condicionada a diversos fatores, como os custos de implementação, a eficiência operacional dos sistemas e o potencial de retorno financeiro, que variam conforme as características específicas de cada propriedade (Sharara et al., 2020).

Dessa forma, torna-se fundamental avaliar os impactos econômicos associados às diferentes estratégias de manejo de dejetos, considerando a separação de frações dos resíduos e o tempo de retenção hidráulica na biodigestão anaeróbia. Esses elementos podem afetar significativamente a eficiência dos processos e a viabilidade econômica dos diferentes métodos de tratamento. A análise deve contemplar tanto os custos com a implantação quanto o potencial de retorno financeiro para os produtores, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisões mais fundamentadas no manejo de dejetos da pecuária leiteira.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica de diferentes cenários de tratamento dos dejetos de bovinos leiteiros, por meio da biodigestão anaeróbia e/ou compostagem, considerando a adoção de separação de frações e sob dois tempos de retenção hidráulica.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo adotou uma abordagem baseada na modelagem de cenários econômicos, fundamentada em dados experimentais previamente obtidos por Leite (2024). O experimento envolveu o tratamento de dejetos de bovinos leiteiros com inclusão de monensina sódica na dieta, avaliando sistemas com e sem separação de frações, por meio dos processos de compostagem e biodigestão anaeróbia. Os dados técnicos gerados nesse experimento serviram como base para a definição dos parâmetros utilizados nas simulações econômicas realizadas no presente trabalho.

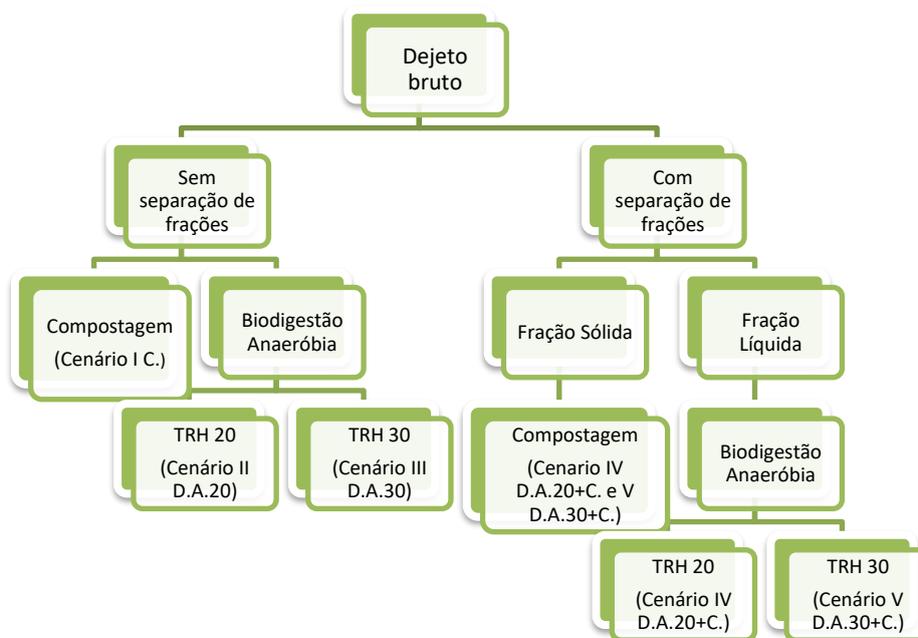
### **2.1 Simulação dos Diferentes Cenários**

#### **2.1.1 Caracterização do Sistema de Produção**

Em relação ao sistema de produção de bovinos leiteiros, foi considerado um rebanho de 200 animais, criados em sistema intensivo e alojados em um galpão convencional, em baias, comedouros e bebedouros individuais. A remoção dos dejetos da instalação foi considerada de duas formas, por raspagem, no cenário em que os resíduos foram destinados exclusivamente à compostagem; e por lavagem do piso, nas condições em que os dejetos foram encaminhados à biodigestão anaeróbia. Após a coleta, os dejetos passaram pelo processo ou não de separação das frações. Na condição com separação, o dejetos bruto foi submetido a um separador horizontal de prensas e roscas separadoras de sólidos e líquidos que originou duas frações: a sólida que foi direcionada a compostagem e a líquida, destinada ao processo de biodigestão anaeróbia no biodigestor modelo canadense.

Os animais receberam uma dieta balanceada à base de alimento volumoso e concentrado, com a inclusão de monensina sódica na dosagem de 1,8 mg/kg de

matéria seca ingerida (MSI), o que resultou na demanda anual de 33,05 kg de monensina sódica para todo o rebanho. A dosagem adotada baseou-se nos resultados obtidos por Leite et al. (2024), que identificaram nesta dose a máxima eficiência de conversão da matéria orgânica dos dejetos em biogás e metano durante o processo de biodigestão anaeróbia.



**Figura 1.** Organograma do processo com ou sem separação de frações do dejetos até a destinação do tratamento em cada cenário. C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

### 2.1.2 Descrição dos Cenários Avaliados

Foram simulados cinco cenários de manejo e tratamento de dejetos, combinando as tecnologias de compostagem e/ou biodigestão anaeróbia, com ou sem separação das frações, sólida e líquida, e adotando tempos de retenção hidráulica (TRH) de 20 ou 30 dias (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos cenários avaliados considerando os diferentes tratamentos de dejetos de bovinos leiteiros.

Cenário	Compostagem	Biodigestão	Separação de frações	TRH (dias)
I	Sim	Não	Não	-
II	Não	Sim	Não	20
III	Não	Sim	Não	30
IV	Sim	Sim	Sim	20
V	Sim	Sim	Sim	30

TRH = Tempo de Retenção Hidráulica

### 2.3 Concentração de Monensina nos Dejetos

Foi realizada a quantificação da monensina sódica em amostras das frações peneirada e não peneirada dos dejetos. Seguindo conforme os procedimentos descritos em American Public Health Association (APHA), 24<sup>a</sup> edição (2023).

Foi observada redução na carga de monensina presente na amostra após o peneiramento, com a concentração de 0,92 mg de monensina sódica/kg de ST dejetos, referente à fração líquida, enquanto, no dejetos sem peneiramento, a concentração foi de 1,53 mg de monensina/kg de ST dejetos. Estes resultados indicam que a fração não peneirada resultou em substratos com maiores concentrações de monensina sódica no início do processo de biodigestão anaeróbia.

### 2.4 Estimativa de Produção de Fertilizantes e Bioenergia

Na análise da eficiência dos tratamentos, foram considerados aspectos relacionados à produção e composição dos dejetos, assim como o potencial de produção dos fertilizantes orgânicos (composto e biofertilizante) e a capacidade energética do biogás. Em todos os cenários, adotou-se a produção diária de dejetos por animal e sua respectiva concentração de sólidos totais (ST), considerando os parâmetros zootécnicos e produtivos apresentados na Tabela 2 e obtidos por Leite et al. (2024). Esses valores foram extrapolados para o rebanho. Os principais indicadores operacionais dos sistemas de tratamento estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 2 – Parâmetros de produção de dejetos bovinos leiteiros utilizados nos cálculos econômicos.

Parâmetro	Quantidade
Produção diária de dejetos por animal	19,84 kg/ animal/dia
Concentração de sólidos totais (ST) no dejetos	21,74%
Produção diária de dejetos (ST)	4,37 kg/animal/dia
Produção diária total de dejetos (ST) pelo rebanho	874 kg/dia

Adaptado de Leite et al., 2024

Tabela 3 – Parâmetros operacionais obtidos nos diferentes cenários de tratamento de dejetos de bovinos leiteiros.

Cenário	Potencial de produção de biogás (L biogás / kg de ST adicionado)	Concentração de ST no Afluente (%)	Redução de ST (%)
I - C.	–	–	54,28
II - D.A. 20	100,42	2,47	40,86
III - D.A. 30	150,12	2,47	55,68
IV - D.A. 20 + C.	157,06	1,39	45,69
V - D.A. 30 + C.	199,61	1,39	59,62

Adaptado de Leite et al., 2024. ST = sólidos totais.

C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

Com base nos teores de nutrientes (N, P e K) encontrados em cada fertilizante orgânico (Tabela 4), calcularam-se as respectivas produções anuais (kg/ano) destes nutrientes. Para isso, considerou-se também a quantidade de ST ao final do processo de compostagem, nos cenários I C., IV D.A.+20+C. e V D.A.30+C. Adicionalmente, o volume de metano gerado a partir da biodigestão anaeróbia, considerando-se a quantidade de ST adicionada ao digestor, foi convertido em energia elétrica (kWh/ano), com base no poder calorífico do metano e na eficiência da conversão energética.

Tabela 4 - Concentração de nutrientes (% dos sólidos totais) nos biofertilizantes em cada cenário, conforme os tratamentos aplicados aos dejetos de bovinos leiteiros.

Nutriente	Cenários				
	I - C.	II - D.A. 20	III - D.A. 30	IV - D.A. 20 + C.	V - D.A. 30 +C.
N <sub>composto</sub>	2,65	-	-	2,65	2,65
P <sub>composto</sub>	2,10	-	-	2,10	2,10
K <sub>composto</sub>	1,00	-	-	1,00	1,00
N <sub>digestato</sub>	-	2,17	2,51	2,40	2,21
P <sub>digestato</sub>	-	1,63	1,63	1,58	1,58
K <sub>digestato</sub>	-	0,95	0,95	0,69	0,70

Adaptado de Leite et al., 2024.

C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

## 2.5 Avaliação da Viabilidade Econômica

A avaliação da viabilidade econômica dos cinco cenários de tratamento dos dejetos foi conduzida com base na análise incremental de fluxos de caixa projetados, considerando um horizonte de 15 anos. Para cada cenário, foram estimadas as receitas, os custos operacionais e investimentos fixos referentes ao período de um ano, com o objetivo de mensurar a viabilidade econômica das alternativas avaliadas. As receitas incluíram a valorização dos nutrientes (N, P e K) presentes nos fertilizantes orgânicos gerados, em equivalência aos principais fertilizantes comerciais, e a geração de energia elétrica a partir da conversão do biogás em energia, considerando-se os teores de metano na sua composição.

Os custos fixos englobaram o investimento inicial necessário para a instalação das estruturas de compostagem e biodigestão anaeróbia e nos custos variáveis, foram incluídas as despesas com mão de obra destinada ao manejo dos dejetos, a aquisição da monensina sódica, o seguro sobre o capital fixo, os gastos com a manutenção dos equipamentos e o custo de energia para uso do peneirador. Para a estimativa dos custos de investimento, foram realizados orçamentos junto a empresas especializadas do setor, contemplando a cotação de todos os insumos e

equipamentos necessários. Os valores obtidos refletem as condições de mercado vigentes durante o período da pesquisa.

Levando em consideração os resultados gerados por Leite et al. (2024) e considerando-se a produção de dejetos pelos animais, foram estimadas as áreas destinadas ao tratamento dos resíduos e a infraestrutura necessária para sua implantação, sendo planejada com base nos equipamentos e recursos já disponíveis na propriedade, além de considerar os que seriam necessários à aquisição.

Para a compostagem, considerou-se a necessidade de: (i) um pátio com piso de alvenaria e cobertura para proteção contra intempéries, com área total de 1.145 m<sup>2</sup> no cenário I e de 547 m<sup>2</sup> nos cenários IV - D.A.20+C. e V - D.A.30+C.; e (ii) um distribuidor de fertilizante para o adubo gerado.

No caso da biodigestão anaeróbia, a estrutura planejada incluiu: (i) um biodigestor com capacidade compatível com o volume diário de dejetos gerado e com o tempo de retenção hidráulica (TRH) adotado, (ii) uma lagoa para o armazenamento do biofertilizante produzido, (iii) um sistema para queima do biogás, (iv) um transformador para conversão do biogás em energia elétrica, e (v) uma bomba para aplicação do biofertilizante. Nos cenários com separação de frações foi acrescentado o custo do peneirador. No projeto considerou-se a utilização de um trator para transporte dos resíduos da área de alojamento dos animais até os locais de tratamento. Entretanto, o custo desse equipamento não foi estimado, uma vez que os pecuaristas, em geral, já o possuem em suas propriedades. Os custos dos biodigestores foram calculados com base nos volumes estimados para cada cenário: II - D.A.20 - 88 m<sup>3</sup>, III - D.A.30 - 131 m<sup>3</sup>, IV - D.A.20+C - 137 m<sup>3</sup>, V - D.A.30+C - 175 m<sup>3</sup>.

Para a conversão dos custos em dólar (US\$), utilizou-se a taxa de câmbio de R\$5,74 por dólar, conforme cotação oficial do Banco Central do Brasil (BCB) em 06-03-2025.

Em relação à mão de obra (MO) e aos encargos, foram considerados os serviços necessários para o transporte dos dejetos desde a área de alojamento dos animais até os respectivos sistemas de tratamento, bem como as atividades de peneiramento (quando aplicável), alimentação diária do biodigestor e da composteira, manutenção dos sistemas e aplicação do biofertilizante e do composto

orgânico. Considerou-se o salário mensal de R\$ 1.864; com encargos calculados através do percentual de 45,59% (Conab, 2020). Com base nesses valores, o custo da hora de trabalho foi estimado em R\$ 11,31.

O custo de manutenção foi estimado em 2,5% sobre o valor inicial do projeto, pautado na metodologia proposta por Martins e Oliveira (2011). Para o cálculo do custo com óleo diesel, considerou-se o consumo relacionado à operação diária do trator utilizado no transporte dos dejetos do galpão até os sistemas de tratamento, atividade que demanda, em média, uma hora por dia.

O custo com energia elétrica foi estimado com base no consumo anual (KWh), considerando o funcionamento do transformador de biogás e do peneirador utilizados nos processos de tratamento dos dejetos. O seguro sobre o capital fixo foi considerado como uma provisão para possíveis danos, assim como perdas parciais ou totais, dos bens, adotando a taxa de 0,75% ao ano, conforme Conab (2020). Incluiu-se também o imposto sobre a propriedade territorial rural (ITR), proporcional à área destinada à implantação do projeto em cada cenário. Em relação à depreciação dos equipamentos, foi adotado o método linear, levando-se em conta o valor residual daqueles cuja vida útil ultrapassa o horizonte do projeto, possibilitando sua reutilização ou revenda ao final desse período. O benefício econômico baseou-se na produção de biogás e biofertilizantes. Em relação ao biogás, a receita foi estimada com base na capacidade anual de geração de energia elétrica (KWh), associada à tarifa de energia elétrica vigente no país, conforme o Sistema de Bandeiras Tarifárias.

Para os biofertilizantes, foram utilizados os teores de N, P e K em sua composição, e os respectivos valores de mercado dos fertilizantes químicos de referência: ureia (fonte de N), do superfosfato simples - SPS (fonte de P) e cloreto de potássio (fonte de K). A cotação dos fertilizantes foi obtida no ACERTO Weekly Fertilizer Report Brazil, no dia 10-02-2025, sendo cotados em dólar por tonelada: US\$ 305 (KCl); US\$ 390 (ureia) e US\$ 210 (SPS). O valor econômico foi obtido multiplicando-se o preço por quilograma de cada nutriente (US\$/kg) pela respectiva quantidade anual produzida (kg/ano). A receita total estimada com o biofertilizante corresponde à soma das receitas associadas aos três nutrientes.

Para refletir a capacidade operacional do gerador (125 kVA) em cada cenário,

foi estimado o tempo diário de operação do equipamento a partir da razão entre o volume de biogás disponível por dia ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ) e consumo específico do gerador ( $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Essa estimativa foi empregada no cálculo da energia gerada por dia. O valor energético total foi calculado com base no preço de mercado da energia quilowatt-hora (US\$/kWh), permitindo estimar a receita bruta associada à geração de energia.

A análise de viabilidade econômica dos cenários propostos, foram adotados os seguintes indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback Descontado (PBD), índices de lucratividade — Profitability Index (IL) e Razão Benefício-Custo (B/C), Equivalente Uniforme Anual (EUA) e Análise de risco por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC).

A análise de sensibilidade foi aplicada com o objetivo de identificar quais fatores de entrada podem impactar significativamente um investimento, seja de forma positiva ou negativa. Assim, ajudando a avaliar a robustez do projeto em diferentes cenários, com base nas variações de mercado como custos, receitas, inflação e demanda, e sendo indispensável priorizar as variáveis críticas para orientação da tomada de decisão em ambientes de incerteza (Borgonovo et al., 2016; Brealey et al., 2020). Por meio dessa análise, foi possível verificar que as alterações em parâmetros específicos, como custos operacionais, taxas de juros e preços de venda, influenciam os indicadores financeiros como o VPL e o TIR (Pindyck et al., 2018).

Inicialmente, foram definidas as variáveis de entrada, como por exemplo, custos, juros e receitas, atribuindo-se a cada uma delas distribuições de probabilidade podendo ser normal, triangular, uniforme, entre outras. Assim, gerando repetidamente em milhares ou milhões de vezes valores aleatórios para essas variáveis (Glasserman, 2004). Em seguida, para cada conjunto amostrado, foram calculados os indicadores de resultados (ex.: VPL, TIR), permitindo a construção de uma distribuição probabilística das saídas. Por fim, os resultados obtidos são analisados para produzir distribuições de probabilidade, intervalos de confiança e métricas de risco. Essa abordagem reforçou a confiabilidade das conclusões, destacando-se como ferramenta essencial para projetos com alta variabilidade de parâmetros.

A incorporação das incertezas dos fluxos de caixa foi realizada por meio da Simulação de Monte Carlo, metodologia recomendada por Saltelli et al. (2019) para

análises econômicas em ambientes incertos.

Para este projeto, foi adotado o método do fluxo de caixa incremental, uma vez que se prevê a substituição parcial ou total da energia elétrica consumida na propriedade pela energia gerada a partir do biogás, além da geração de receita com a comercialização dos fertilizantes orgânicos. Desta forma, o investimento tende a ser recuperado por meio da economia obtida na fatura de energia elétrica, bem como pelo retorno financeiro decorrente da utilização dos fertilizantes produzidos, o que reduz a necessidade de compra de adubos comerciais.

Foi empregada uma abordagem abrangente de análise de viabilidade econômica, utilizando diferentes índices com o objetivo de fornecer uma avaliação sólida e fundamentada dos cenários propostos. A combinação desses indicadores visa aumentar a robustez da análise, oferecendo subsídios mais consistentes para a tomada de decisão quanto à aceitação ou rejeição dos investimentos.

Na tabela 5 são apresentados os investimentos fixos, expressos em dólares, que foram necessários para a implantação e a instalação dos sistemas de biodigestão anaeróbia e compostagem, sendo levados em consideração os diferentes cenários produtivos. A análise desses valores permite uma avaliação comparativa da viabilidade econômica entre os dois sistemas de tratamento separadamente ou em conjunto, levando em consideração os custos iniciais de instalação e equipamentos.

Tabela 5 - Investimentos fixos (US\$, dólar) necessários para implantação e instalação dos sistemas de compostagem e biodigestão anaeróbia em cada cenário produtivo.

Equipamentos / Cenários	I - C.	II - D.A. 20	III - D.A. 30	IV - D.A. 20+C.	V - D.A. 30+C.
Pátio de compostagem	39.286	–	–	19.050	19.050
Distribuidor de fertilizante	560	–	–	560	560
Subtotal (1)	39.846	–	–	19.611	19.611
Peneirador	–	–	–	61.309	61.309
Biodigestor	–	15.788	22.103	22.103	28.419
Distribuidor de biofertilizante	–	3.853	3.853	3.853	3.853
Lagoa	–	2.539	2.539	2.539	2.539
Gerador de energia elétrica	–	50.403	50.403	50.403	50.403
Queimador de biogás	–	2.347	2.347	2.347	2.347
Subtotal (2)	–	74.932	81.248	142.558	148.873
Total	39.846	74.932	81.248	162.169	168.484

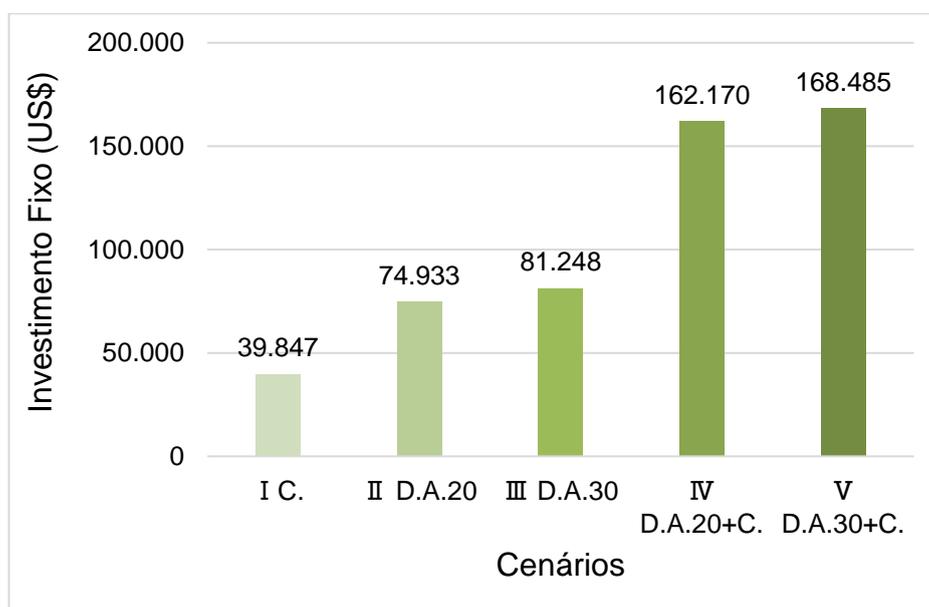
C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Viabilidade econômica

Na tabela 6, apresenta-se a composição do fluxo de caixa anual, também em dólares ao longo do período de 15 anos após o investimento inicial, permitindo a análise da dinâmica financeira de cada alternativa ao longo do tempo.

O fluxo de caixa indicou diferenças substanciais entre os cenários, especialmente quanto às receitas, custos operacionais e investimentos iniciais (Figura 2). No Cenário I, composto exclusivamente pela compostagem, o fluxo de caixa anual do produtor foi limitado a US\$ 5.259/ano (Tabela 6), refletindo baixa capacidade de retorno sobre o investimento. Em contrapartida, esse cenário apresentou o menor investimento inicial (Figura 2) entre todos os avaliados. Nos cenários que incluíram biodigestão, os resultados foram mais expressivos, com fluxos de caixa variando entre US\$ 9.958 a 20.774 por ano (Tabela 6), evidenciando maior rentabilidade, mesmo diante de investimentos iniciais mais elevados (Figura 2).



**Figura 2** - Investimento inicial em cada cenário (Ano 0).

Tabela 6 – Composição do fluxo de caixa anual (US\$), do 1º ao 15º ano após o investimento inicial, em cada cenário.

Descrição / Cenários	I - C.	II - D.A. 20	III - D.A. 30	IV - D.A. 20+C.	V - D.A. 30+C.
1. Receita total	9.102	14.359	18.863	27.997	31.993
1.1 Energia elétrica	–	10.658	15.933	16.669	21.195
1.2 Biofertilizantes	–	3.701	2.930	1.900	9.427
1.1 Adubo sólido	9.102	–	–	9.427	1.369
2. Custo total	4.663	9.699	10.158	19.225	19.683
2.1 Monensina sódica	476	476	476	476	476
2.2 Energia para o uso do peneirador	–	–	–	209	209
2.2 Mão de obra	2.668	1.489	1.489	3.297	3.297
2.3 Seguro sobre o capital fixo	298	562	609	1.216	1.263
2.4 Manutenção	398	1.873	2.031	4.054	4.212
2.5 Depreciação	821	5.298	5.551	9.971	10.223
3. Lucro operacional	4.438	4.659	8.705	8.772	12.309
4. Imposto de renda	0,00	0,00	0,00	0,00	1.759
5. Fluxo de Caixa operacional	4.438	4.659	8.705	8.772	10.550
6. Depreciação	821	5.298	5.551	9.971	10.223
7. Investimento fixo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8. Fluxo de Caixa Líquido do Produtor	5.259	9.958	14.256	18.743	20.774

C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

Tabela 7 - Indicadores de retorno e eficiência econômica dos cenários.

Indicador / Cenário	I - C.	II - D.A. 20	III - D.A. 30	IV - D.A. 20+C.	V - D.A. 30+C.
	(TIR, %)	10,07	10,19	15,54	7,82
(VPL, US\$)	9.832	19.127	53.407	14.862	27.728
(IL, US\$)	1,25	1,26	1,66	1,09	1,16
(B/C, US\$)	1,95	1,10	1,57	1,46	2,58
(VAUE, US \$)	1.040	2.025	5.654	1.573	2.935
(TIRM, %)	7,23	7,28	9,28	6,28	6,74
(PBD, anos)	10,72	10,62	7,33	13,04	11,83

TIR = Taxa Interna de Retorno, VPL = Valor Presente Líquido, IL = índice de lucratividade, B/C = relação custo/benefício, VAUE = Valor Anual Uniforme, TIRM = Taxa Interna de Retorno Modificada, PBD = Período de Payback Descontado

C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

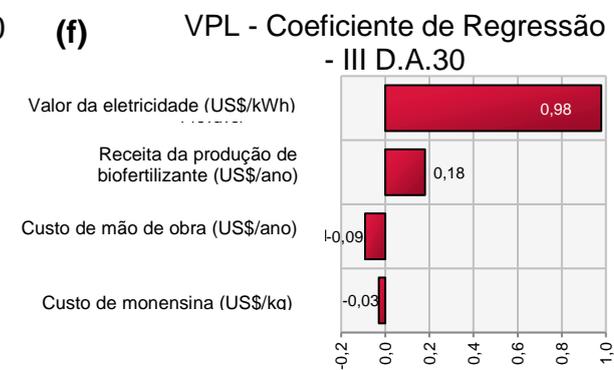
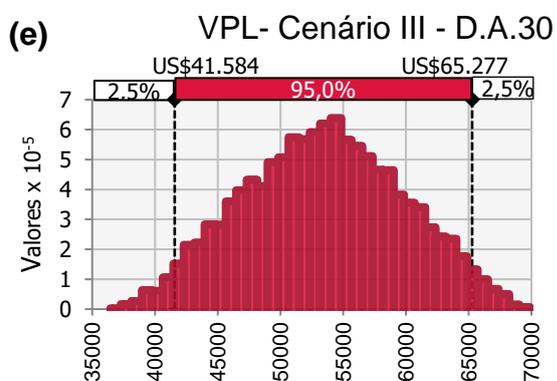
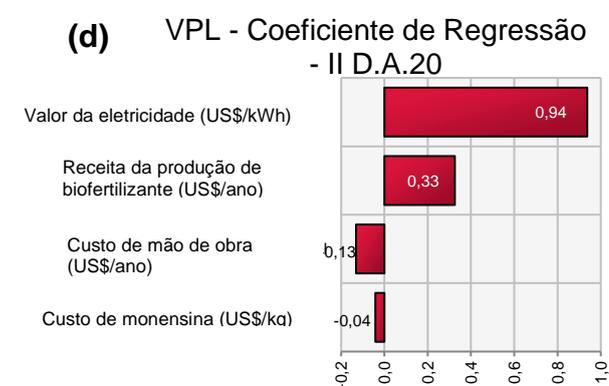
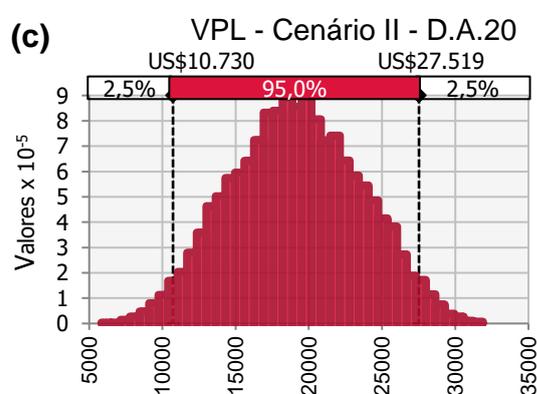
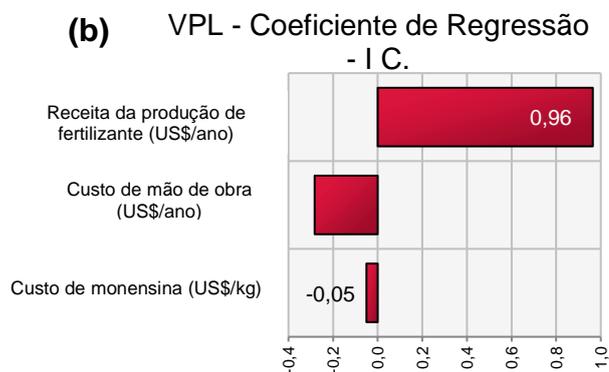
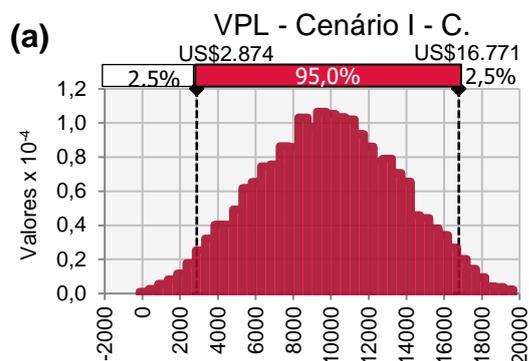
Considerando um horizonte de 15 anos e uma TMA de 6% ao ano, todos os cenários avaliados apresentaram VPL positivo (Tabela 7), indicando viabilidade econômica nas condições analisadas. O Cenário III D.A.30 destacou-se entre os demais, apresentando maiores valores de TIR (15,54%), VPL (US\$ 53.407) e IL (1,66), e PBD de 7,33 anos. No Cenário IV D.A.20+C, onde a compostagem foi combinada com a biodigestão anaeróbia dos dejetos como TRH de 20 dias, verificou-se a menor TIR (7,82%). O IL próximo ao ponto de equilíbrio e o maior PBD reforçam esse cenário como o menos vantajoso, com margem de lucratividade bastante limitada.

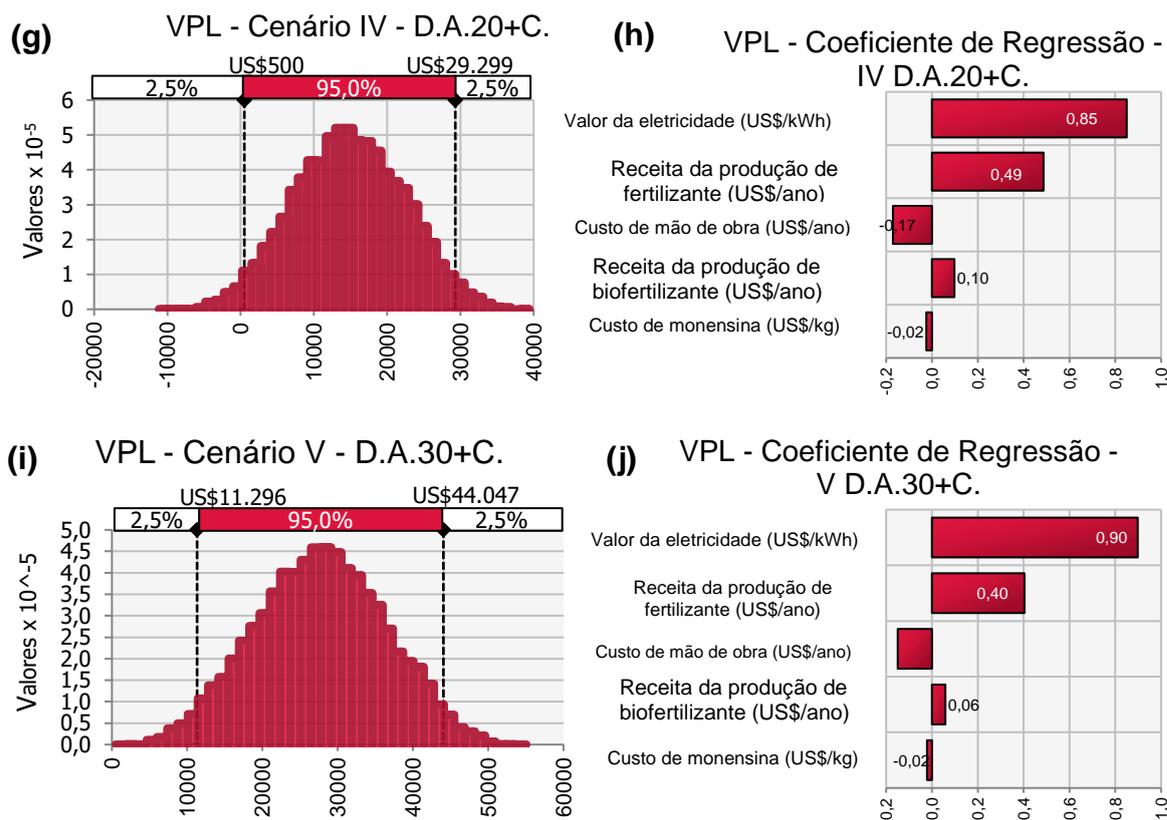
Os Cenários I - C., II - D.A.20 e V - D.A.30+C. apresentaram desempenho intermediário, com TIRs entre 8,9% e 10,19% (Tabela 7). O Cenário II obteve a menor relação B/C (1,1), enquanto nos demais cenários a relação B/C foi 1,95 (I) e 2,87 (V). O PBD variou de 10,62 a 11,83 anos. O Cenário I, baseado exclusivamente na compostagem, apresentou TIR de 10,07% e VPL de US\$ 9.832,06. O PDB foi de 10,7 anos.

A análise do fluxo de caixa incremental mostrou que o investimento inicial variou de US\$ 39.846 (Cenário I C.) a US\$ 168.484 (Cenário V D.A.30+C.), afetando o tempo de retorno. Além disso, a receita anual foi mais elevada em cenários integrados como o V D.A.30+C., que resultou de caixa anual de US\$ 20.774, frente

a apenas US\$ 5.259 no Cenário I C.

No Cenário III D.A.30, o intervalo de confiança de 95% para o VPL variou entre US\$ 41.584 e US\$ 65.277, com praticamente todas as simulações resultando em retorno positivo. A análise de sensibilidade evidenciou que a receita da energia elétrica foi o principal fator de influência, respondendo por 98% da variância do VPL.





**Figura 3** – Análise de sensibilidade e coeficiente de regressão do Valor Presente Líquido (VPL) obtidos por simulação de Monte Carlo, para os cenários I - C., II - D.A. 20, III - D.A. 30, IV - D.A. 20+C. e V - D.A. 30+C. C: compostagem, D.A: digestão anaeróbia, 20: TRH de 20 dias, 30: TRH de 30 dias.

No Cenário I C., a simulação indicou intervalo de confiança de US\$2.874 a US\$16.771 (Figura 3), também com distribuição simétrica. Apesar da estabilidade frente às incertezas, o retorno foi modesto e fortemente dependente da venda do composto. A análise de sensibilidade reforçou essa dependência, mostrando que 96% da variância do VPL é atribuída à produção de fertilizantes, enquanto custos operacionais e a monensina apresentaram baixa influência.

Em síntese, os resultados confirmam a superioridade econômica do Cenário III D.A.30, tanto pela maior rentabilidade quanto pela resiliência frente às incertezas de mercado, destacando-se como a opção mais segura e atrativa entre as alternativas avaliadas.

#### 4. Discussão

Em diversos estudos já conduzidos (Arikan et al., 2018; Spirito et al., 2018; Leite et al., 2024), a inclusão de monensina na alimentação dos animais pode resultar em substratos que deprimem as produções de biogás e metano a partir dos dejetos. Leite et al., (2024), observaram que a presença de monensina nos dejetos de bovinos leiteiros reduziu significativamente a produção de metano, sobretudo quando utilizados *in natura*. A separação das frações sólida e líquida vem como um auxílio para diminuir a concentração do antibiótico na fração líquida, resultando em maior eficiência na digestão e melhor desempenho energético.

Spirito et al. (2018) também verificaram que doses crescentes de monensina, especialmente 10 mg/L, inibiram fortemente a produção de metano e alteraram a flora microbiana presente nos biodigestores batelada. Mesmo em menores concentrações, o antibiótico comprometeu o desempenho do sistema.

Arikan et al., (2018) complementam esses achados ao demonstrarem que, embora parte da monensina seja degradada durante o início do processo de biodigestão anaeróbia, quantidades residuais persistem no sistema, sendo responsáveis pela redução na atividade metanogênica. Os autores também destacam que o impacto é mais acentuado nas fases iniciais da digestão, sugerindo a importância do tempo de retenção para mitigar os efeitos negativos do antibiótico.

Nesse contexto, a separação de frações é uma importante alternativa para reduzir este impacto, permitindo que a fração com menor concentração do antibiótico apresente melhor rendimento energético quando em digestão, e assim também melhore a viabilidade econômica da atividade. Além do peneiramento, o correto ajuste do tempo de retenção do substrato também incide de forma direta sobre os potenciais de produção de biogás e metano, sobretudo em condições da presença de antibiótico, refletindo assim no retorno econômico do investimento realizado no tratamento dos resíduos.

Então a inclusão da monensina na dieta dos animais, mesmo afetando o desempenho da biodigestão anaeróbia, apresentou baixa influência direta sobre os indicadores financeiros no modelo de sensibilidade. Esse aditivo atua reduzindo o consumo dos animais e, conseqüentemente, a excreção de dejetos. Com isso, o volume de dejetos a ser manejado diminui, o que pode representar menor custo de

transporte, armazenamento e tratamento. Essa redução de carga orgânica contribui para maior eficiência operacional em propriedades de menor escala, onde o custo logístico do manejo de resíduos representa parcela relevante das despesas totais. Assim, embora a monensina não tenha se mostrado um fator determinante para a variabilidade do VPL, sua adoção pode reforçar a sustentabilidade do sistema e otimizar o aproveitamento dos resíduos.

Estas condições de digestão possivelmente contribuíram de forma positiva para a melhor viabilidade econômica nos cenários III - D.A. 30, onde ocorreu o substrato sem peneiramento, mas retido por 30 dias, e no cenário V - D.A. 30+C., onde ocorreu o peneiramento e a retenção por 30 dias.

O desempenho do cenário I C. pode ser atribuído, em grande parte, ao baixo custo de implementação e operação da compostagem tradicional, uma tecnologia de alta adaptabilidade às realidades de pequenas e médias propriedades. Palese et al., (2020) demonstraram a viabilidade econômica da compostagem de esterco (bovino, suínos e aves) em unidades rurais de pequeno porte, justamente por reduzir a necessidade de investimentos externos e valorizar recursos locais disponíveis.

Nesse contexto, a comercialização do composto e a possibilidade de substituição parcial ou total de fertilizantes minerais configuram vantagens econômicas relevantes, sobretudo em países em desenvolvimento, como apontam (Fan et al., 2016). Apesar dessas vantagens, a forte dependência do mercado de fertilizantes minerais limita o potencial de atratividade da compostagem isolada em situações de instabilidade de preços, uma vez que o retorno financeiro direto tende a ser baixo.

Assim, embora o cenário I C. apresente baixo retorno financeiro, ele se mantém como alternativa segura, de baixo investimento inicial e adequada para produtores com orçamento restrito, pouco capital de longo prazo ou acesso limitado a financiamentos, como evidenciado em Tan et al. (2022), que reforçam que a compostagem limita a geração de receitas. Mas de acordo com Lin et al. (2018), a atratividade relativa entre a digestão anaeróbia em comparação a compostagem depende fortemente da escala de implantação e da valorização dos produtos gerados, evidenciando que a escolha entre as tecnologias não deve ser apenas econômica, mas também contextual e estratégica sempre a depender dos limites do recurso e do

perfil do produtor.

Por outro lado, o cenário III - D.A. 30 se destacou como alternativa mais robusta e atrativa, apresentando maior TIR, VPL e menor PBD. Esse resultado está relacionado ao rendimento de biogás incrementado devido ao maior TRH de 30 dias, conseqüentemente, aumento a geração de energia elétrica, conforme também relato por Leite et al., (2024) também observaram maior rendimento de metano em reatores operados com TRH de 30 dias, reforçando a importância desse fator e a digestão do substrato sem peneiramento, que reduziu o investimento inicial pela não aquisição do separador de frações. Essa configuração resultou em um fluxo de caixa consistente e com margens de lucratividade mais elevadas, tomando o cenário economicamente mais seguro e resiliente.

Os resultados de TIR e payback obtidos nos cenários I - C.,II - D.A.20,V - D.A.30+C. não estão totalmente alinhados com os de Tan et al. (2022), que relataram TIRs entre 6,0% e 15% e paybacks entre 6 e 15 anos em diferentes cenários de tratamento dos dejetos de bovinos, em mono ou co-digestão. De forma semelhante, O'Connor et al. (2020), por sua vez, observaram TIRs de até 11% em propriedades de pequeno porte na Irlanda, com paybacks de 3,88 a 11,03 anos, mesmo com incentivos.

No Cenário IV - D.A. 20+C., se tem um maior risco de investimento e retorno a longo prazo, além do menor rendimento energético associado ao TRH reduzido, o investimento para separação das frações sólido-líquido pode ter contribuído negativamente para o desempenho econômico. Conforme Nolan et al. (2022), embora a separação de frações dos substratos possa favorecer o desempenho da biodigestão e a qualidade do biofertilizante, também poderá comprometer a atratividade econômica.

A Análise de Monte Carlo reforçou a confiabilidade do Cenário III - D.A.30. O intervalo de confiança de 95% para o VPL variou entre US\$ 41.584 e US\$ 65.277, com praticamente todas as simulações indicando retorno positivo. Isso demonstra baixa probabilidade de perdas financeiras, mesmo diante de flutuações em custos e receitas. Além disso, a distribuição simétrica dos resultados evidencia que não há viés de risco concentrado em extremos negativos, resultados semelhantes foram demonstrados por Nurgaliev et al., (2023), em estudo que avaliou a produção de

biogás a partir de diferentes misturas de substrato e cenários de comercialização de eletricidade, as simulações de Monte Carlo indicaram alta probabilidade de VPL positivo e mostraram que a receita proveniente com energia elétrica é a variável de maior influência sobre os resultados econômicos.

A análise de sensibilidade revelou que 98% da variância do VPL está associada à receita proveniente da energia elétrica, consolidando a eletricidade como principal motor econômico do projeto. Esse resultado indica que variações nos preços da energia ou nas políticas de incentivo à sua comercialização terão impacto decisivo sobre a atratividade desse tipo de empreendimento.

Esses resultados estão em concordância com Guares et al., (2021), que ao avaliarem a viabilidade técnica e econômica da geração de energia elétrica e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, identificaram que a escala de produção o aproveitamento energético são fatores decisivos para a atratividade financeira. Nesse sentido, recomenda-se a realização de estudos considerando diferentes escalas em relação a quantidades de animais e volumes de resíduos gerados, visando dimensionar adequadamente os sistemas e avaliar sua atratividade econômica em distintos contextos produtivos.

É importante destacar que os resultados da análise econômica e da simulação de risco refletem as condições atuais de mercado, preços de insumos e escala de operação. A viabilidade financeira observada está diretamente relacionada a escala de produção da propriedade (número de animais alojados), ao volume de dejetos disponíveis para tratamento e à possibilidade de utilização ou comercialização do composto orgânico produzido. Em propriedades com geração reduzida de resíduos ou sem estrutura logística/comercial, a atratividade econômica pode ser menor (Antônio et al., 2018).

Da mesma forma, a biodigestão, apesar de tecnicamente viável em determinados cenários, depende de investimentos iniciais mais elevados e da existência de infraestrutura para o aproveitamento do biogás ou da energia elétrica gerada. Assim, recomenda-se a reavaliação periódica dos cenários conforme mudanças nos preços, subsídios e políticas ambientais (Nurgaliev et al., 2023; Guares et al., 2021).

## 5. CONCLUSÕES

A biodigestão anaeróbia sem separação de frações com TRH 30 dias (Cenário III - D.A.30), demonstrou ser a alternativa mais viável e atrativa, com melhores indicadores econômicos. Os cenários I - C., II - D.A.20 e V - D.A.30+C. apresentaram desempenho econômico inferior, podendo ser considerados como alternativas secundárias, especialmente se fatores não financeiros ou restrições operacionais impossibilitarem a implementação do Cenário III - D.A.30. O Cenário IV - D.A.20+C., por sua vez, mostra-se como a opção menos atraente, com exceção do indicador B/C que, isoladamente, sugere desempenho excepcional.

A análise de sensibilidade indicou baixo risco de investimento para todos os cenários, com 100% das simulações resultando em VPL positivo. As principais fontes de variabilidade foram a venda de energia elétrica (Cenário III D.A.30) e de fertilizante (Cenário I - C.). Os resultados reforçam a robustez do Cenário III - D.A.30, mas indicam que a escolha da tecnologia deve considerar a limitação financeira para o investimento inicial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida P.S., et al. (2023). Integrated production of hydrogen and methane in a dairy biorefinery using anaerobic digestion: Scale-up, economic and risk analyses. **Journal of Environmental Management** 348:119215. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119215>.

Antônio, A. S.; Oliveira Filho, D.; Silva, S. C. da. Electricity generation from biogas on swine farm considering the regulation of distributed energy generation in Brazil: a case study for Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 4, p. 518-525, jul./ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p518-525/2018>

Arikan O.A., Mulbry W., Rice C., Lansing S. (2018). The fate and effect of monensin during anaerobic digestion of dairy manure under mesophilic conditions. **PLOS ONE** 13(2):e0192080. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192080>.

APHA - American Public Health Association. Standard methods for the examination of

- water and wastewater. 24th ed. Washington DC: APHA, AWWA, WEF, 2023, 1624p.
- Brealey R.A., Myers S.C., Allen F. (2020). **Princípios de finanças corporativas**. 12. ed. McGraw Hill.
- Borgonovo E., Plischke E. (2016). **Sensitivity analysis: A review of recent advances**. European Journal of Operational Research 248(3):869-887.
- Cervi R.G., Esperancini M.S.T., Bueno O.C. (2010). Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola** 30(5):831-844.
- Czekala W., et al. (2020). Biogas production from animal manure: A review of the potential and challenges. **Energies** 13(14):3654.
- Conab (Companhia Nacional de Abastecimento) (2020). **Norma metodologia do custo de produção**. 45 p. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/images/arquivos/normativos/30000\\_sistema\\_de\\_operacao\\_s/30.302\\_Norma\\_Metodologia\\_de\\_Custo\\_de\\_Producao.pdf](https://www.conab.gov.br/images/arquivos/normativos/30000_sistema_de_operacao_s/30.302_Norma_Metodologia_de_Custo_de_Producao.pdf). Acessado em: jan. 2025.
- Damodaran A. (2021). **Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset**. 3. ed.
- Dimson E., Marsh P., Staunton M. (2022). **Credit Suisse global investment returns yearbook**.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (2019). **Manejo de dejetos de bovinos leiteiros**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. (Circular Técnica, 125).
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2025) **Anuário Leite 2025: Produção de leite e mudanças climáticas**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. Edição digital. Disponível em: <https://www.embrapa.br/gado-de-leite>.
- Fiorese E., Vaz C.R., Ricci M.R., Borges C.P. (2023). **Análise econômica de tempo de retorno de uma planta produtora de biogás em aviários de médio porte**. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Fan Y.V., et al. (2016). Economic assessment system towards sustainable composting quality in the developing countries. **Clean Technologies and Environmental Policy** 18(8):2479-2491. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1209-9>.

Fishman G.S. (2013). **Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications**. Springer.

FMI (Fundo Monetário Internacional) (2023). **World economic outlook**.

Glasserman P. (2004). **Monte Carlo methods in financial engineering**. Springer.

Golder H.M., et al. (2020). Meta-analysis of the effects of monensin in beef cattle on feed efficiency, body weight gain, and dry matter intake. **Journal of Animal Science** 98(2).

Goyal A., et al. (2022). High-growth investment strategies. **Journal of Finance**.

Ibge (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2022). **Pesquisa da pecuária municipal (PPM) 2022**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>.

Grell T., Harris P.W., Marchuk S., Jenkins S., McCabe B.K., Tait S. (2024). Biochemical methane potential of dairy manure residues and separated fractions: An Australia-wide study of the impact of production and cleaning systems. **Bioresource Technology** 391:129903. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129903>.

Irvine G., Lamont E.R., Antizar-Ladislao B. (2010). Energy from waste: Reuse of compost heat as a source of renewable energy. **International Journal of Chemical Engineering** 2010:1-10. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2010/627930>.

Kumar S., et al. (2020). Composting of organic waste: A sustainable approach for waste management and soil enrichment. **Journal of Environmental Management** 270:110831.

Leite, B. K. V. (2024). **Influência da monensina na dieta de bovinos sobre as características dos dejetos e alternativas de minimizar os impactos no tratamento dos resíduos**. 90 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – UFGD, Dourados, MS.

Leite, B. K. V., Orrico, A. C. A., Orrico Junior, M. A. P., Aspilcueta Borquis, R. R., Costa, É. C. P. da, Menezes, I. S. de, Oliveira, J. D. de, Macena, I. A. (2024). Effect of Monensin Supplementation in the Bovine Diet on the Composition and Anaerobic

Digestion of Manure with and without Screening. **Fermentation**, v.10, n.9, p. 474.

Li Y., et al. (2021). Anaerobic digestion of livestock manure: A review of recent advances and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 135:110137.

Martins, F. M., & de Oliveira, P. A. (2011). Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura. *Engenharia Agrícola*, 31, 477-486.

Mazurkiewicz J. (2023). The impact of manure use for energy purposes on the economic balance of a dairy farm. **Energies** 16(18):6735. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16186735>.

Metropolis N., Ulam S. (1949). **The Monte Carlo method**. *Journal of the American Statistical Association*.

Nurgaliev, Timur; Koshelev, Valery; Müller, Joachim. (2023). Risk Analysis of the Biogas Project. **BioEnergy Research**, Stuttgart, v. 16, n. 4, p. 2574–2589. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10583-w>.

Guares, S. A. et al. (2021). Techno-economic model to appraise the use of cattle manure in biodigesters in the generation of electrical energy and biofertilizer. **Biomass and Bioenergy**, v. 150, 106107, p. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106107>

Observatório do Clima (OC). 2024. Emissões do Brasil têm maior queda em 15 anos. <https://oc.eco.br/emissoes-do-brasil-tem-maior-queda-em-15-anos/>

Oliveira, K. R. et al. Reduced Manure Treatment Needs with Compost-Bedded Pack Systems in Dairy Cows. 2024. **Sustainability**, v.16, n.23, p.10408. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su162310408>.

Pagliari M., et al. (2020). Economic feasibility of biogas production from livestock manure: A global perspective. **Energies** 13(12):3156.

Palese A.M., et al. (2020). Composting as manure disposal strategy in small/medium-size livestock farms: some demonstrations with operative indications. **Agriculture** 10(4):1-18. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/4/118>.

Pindyck R.S., Rubinfeld D.L. (2018). **Microeconomia**. 8. ed. Pearson.

Pinto J.A., et al. (2023). Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. **Cleaner Waste Systems** 5:100097. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chwas.2023.100097>.

Quadar J., et al. (2022). Economic and quality evaluation of composting technologies. In: **Current developments in biotechnology and bioengineering: Advances in composting and vermicomposting technology**. Elsevier, p. 295-317. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91874-9.00012-7>.

Sá M.A., et al. (2021). Manejo de dejetos bovinos na pecuária leiteira: impactos ambientais e alternativas de tratamento. **Revista Brasileira de Zootecnia** 50:e20200123.

Saltelli A., et al. (2019). **Global sensitivity analysis: The primer**.

Sánchez A., et al. (2018). Sustainable management of livestock manure: Strategies for nutrient recovery and reduction of environmental impact. **Science of the Total Environment** 635:1-12.

SgROI F., et al. (2021). Economic analysis of composting and anaerobic digestion plants for organic waste management: A case study in Italy. **Waste Management** 120:709-717.

Sharara M.A., Owusu-Twum M.Y., Runge T.M., Larson R. (2020). Planning methodology for anaerobic digestion systems on animal production facilities under uncertainty. **Waste Management** 104:262-269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.028>.

Silva H.L.C., et al. (2022). Lab-scale and economic analysis of biogas production from swine manure. **Renewable Energy** 186:350-365. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.114>.

Spirito CM, Daly SE, Werner JJ, Angenent LT (2018). Redundancy in Anaerobic Digestion Microbiomes during Disturbances by the Antibiotic Monensin. **Appl Environ Microbiol** 84:e02692-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.02692-17>

Tan W.E., Liew P.Y., Tan L.S., Woon K.S., Mohammad Rozali N.E., Ho W.S., Norruwaida J. (2022). Life cycle assessment and techno-economic analysis for anaerobic digestion as cow manure management system. **Energies** 15:9586.

<https://doi.org/10.3390/en15249586>.

Valverde-Orozco V., et al. (2024). Approach to the circular economy through agro-livestock waste composting with heat recovery and agricultural use of the resulting compost. **Sustainable Chemistry and Pharmacy** 41:101730. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101730>.

World Bank (2023). **Agribusiness investment report**.

Zhang Y., et al. (2022). Economic and environmental benefits of converting livestock manure into bioenergy and biofertilizers: A case study in China. **Journal of Environmental Management** 305:114380.

### **CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esta pesquisa trouxe avanços significativos na compreensão da viabilidade econômica de técnicas de tratamento de dejetos bovinos. Em relação ao ponto de vista socioeconômico, a compostagem apresenta-se como uma solução acessível, capaz de reduzir a dependência de fertilizantes químicos e gerar receitas adicionais por meio da comercialização do composto. Já a biodigestão anaeróbia, embora com maior custo inicial, mostrou potencial em todos os cenários, mas com destaque no maior tempo de retenção hidráulica isoladamente.

A separação de frações pode ter aumentado a complexidade operacional do sistema, mas ainda trouxe um retorno adequado sem comprometer a viabilidade econômica. Como perspectivas futuras, sugere-se: (i) a expansão da análise para diferentes escalas produtivas e regiões, considerando variáveis logísticas; e (ii) a avaliação de modelos de financiamento e incentivos governamentais para tecnologias sustentáveis. Este trabalho, portanto, não apenas oferece subsídios para decisões técnicas e econômicas no manejo de resíduos, mas também abre caminho para pesquisas que unam inovação, sustentabilidade e rentabilidade no agronegócio.

Dessa forma, a escolha entre os cenários deve considerar não apenas os indicadores de viabilidade econômica, mas também o perfil financeiro e os objetivos estratégicos de cada produtor. Por fim, reafirma-se o papel da ciência na transição para uma pecuária mais sustentável, na qual a gestão de resíduos deixe de ser um custo operacional para se tornar uma fonte de valor agregado, beneficiando produtores, o meio ambiente e a sociedade como um todo.