

Modelagem estatística e otimização da codigestão anaeróbia de dejetos suínos e água residuária do processamento da mandioca

José Domingos de Melo Neto^{[1]*}, Vera Lúcia Fülber Domingos de Melo^[2], Leandro Fleck^[3]

^[1] 05302071410@academicos.uems.br. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-1102-3293>

^[2] 06901945957@academicos.uems.br. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-0584-2503>

^[3] leandro.fleck@uems.br. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8763-6404>

* autor correspondente

Resumo

O crescimento das cadeias produtivas da suinocultura e da agroindústria de processamento da mandioca intensifica a geração de resíduos líquidos com elevado potencial poluidor. Neste contexto, a codigestão anaeróbia surge como alternativa promissora para o tratamento conjunto desses efluentes, aliando eficiência ambiental à geração de subprodutos com valor agregado. Este estudo teve como objetivo otimizar o processo de codigestão anaeróbia de dejetos suíno e água residuária do processamento da mandioca, avaliando os efeitos da proporção de mistura e do tempo de operação sobre a remoção de demanda química de oxigênio, cor e turbidez por meio de modelagem estatística. O experimento foi conduzido com base em um Delineamento Composto Central Rotacional, considerando como variáveis independentes a proporção de dejetos suíno e o tempo de operação, totalizando 11 ensaios experimentais. Os dados obtidos permitiram o ajuste de modelos matemáticos estatisticamente significativos ($p < 0,10$), os quais descreveram adequadamente o comportamento do sistema. A otimização simultânea das variáveis indicou como condição ideal os valores codificados de 0,26011 para a proporção de dejetos suíno e 0,2943 para o tempo de operação, resultando em uma desejabilidade global de 0,83029. Os resultados indicaram que as maiores eficiências de remoção foram obtidas em condições operacionais intermediárias, com remoções máximas de 80,99% de demanda química de oxigênio, 93,30% de cor e 76,10% de turbidez, evidenciando o potencial da codigestão anaeróbia associada à modelagem estatística para a otimização do tratamento de efluentes agroindustriais.

Palavras-chave: biotecnologia ambiental; modelagem estatística; saneamento rural; sustentabilidade ambiental; tratamento de efluentes.

Statistical modeling and optimization of the anaerobic co-digestion of swine manure and wastewater from cassava processing

Abstract

The growth of swine production and cassava processing chains has intensified the generation of liquid residues with high pollution potential. In this context, anaerobic co-digestion emerges as a promising alternative for the joint treatment of these effluents, combining environmental efficiency with the production of value-added by-products. This study aimed to optimize the anaerobic co-digestion of swine manure and cassava wastewater by evaluating the effects of mixing ratio and operating time on

the removal of chemical oxygen demand (COD), color, and turbidity through statistical modeling. The experiment was conducted using a Central Composite Rotational Design, considering the proportion of swine manure and the operating time as independent variables, totaling 11 experimental trials. The data obtained enabled the adjustment of statistically significant mathematical models ($p < 0.10$), which adequately described the system behavior. The simultaneous optimization of the variables indicated as optimal condition the coded values of 0.26011 for swine manure proportion and 0.2943 for operating time, resulting in a global desirability of 0.83029. The results indicated that the highest

removal efficiencies were obtained under intermediate operating conditions, with maximum removals of 80.99% for chemical oxygen demand, 93.30% for color, and 76.10% for turbidity, highlighting the potential of anaerobic co-digestion associated with statistical modeling for optimizing the treatment of agro-industrial effluents.

Keywords: environmental biotechnology; environmental sustainability; rural sanitation; statistical modeling; wastewater treatment.

1 Introdução

O Brasil se destaca no cenário internacional pelo expressivo desempenho do setor agropecuário. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), a agropecuária cresceu 15,1% entre 2022 e 2023, contribuindo significativamente para a elevação do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Entre as principais cadeias produtivas, destacam-se a cultura da mandioca e a suinocultura, ambas de ampla distribuição territorial e relevante importância econômica.

Em 2024, a produção brasileira de raízes de mandioca alcançou 19,1 milhões de toneladas, com crescimentos regionais expressivos (IBGE, 2025b). Paralelamente, a suinocultura registrou o abate de 57,86 milhões de cabeças, um aumento de 1,2% em relação a 2023, estabelecendo novo recorde histórico (IBGE, 2025a). Esse avanço, entretanto, intensifica a geração de efluentes líquidos com alto potencial poluidor, cuja composição varia entre nutrientes, matéria orgânica e compostos tóxicos. A água residuária da mandioca, apesar de diluída, contém elevadas concentrações de matéria orgânica, nutrientes e cianeto (Colin *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2011; Schmidt *et al.*, 2023), enquanto os dejetos suínos apresentam alta carga de nitrogênio, fósforo, antibióticos e sais, com potencial de eutrofização de corpos d'água (Paniagua; Santos, 2021).

A fim de mitigar esses impactos, a codigestão anaeróbia surge como alternativa promissora, ao permitir o tratamento conjunto de diferentes resíduos orgânicos. Esse processo microbiológico converte a matéria orgânica em biogás, fonte renovável de energia, e em biofertilizante, que pode substituir parcialmente fertilizantes minerais em sistemas agrícolas (Amaral; Steinmetz; Kunz, 2019; Dupont *et al.*, 2020). Dentre os parâmetros de influência no processo anaeróbia, cita-se a temperatura, sendo que a condição de 35 °C é amplamente reportada na literatura como adequada para a digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais, devido à maior estabilidade operacional e à elevada atividade microbiológica (Steiniger *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a codigestão anaeróbia destaca-se como uma estratégia eficiente no tratamento de resíduos agroindustriais por combinar diferentes substratos, promovendo maior estabilidade do processo e melhor remoção de carga orgânica. Estudos recentes indicam que essa técnica favorece a redução de Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos suspensos e nutrientes, além de melhorar o desempenho microbiológico, especialmente em efluentes complexos como os da suinocultura e do processamento da mandioca, reforçando seu potencial para aplicações ambientalmente sustentáveis (Ibarra-Esparza *et al.*, 2026; González; Peña; Gómez, 2022).

Embora consolidada, a codigestão anaeróbia ainda pode ser aprimorada por meio de ferramentas estatísticas avançadas, capazes de otimizar as condições operacionais e explorar sinergias entre substratos agroindustriais. Nesse contexto, destaca-se a aplicação do delineamento composto central rotacional (DCCR), da análise de variância (ANOVA) e da função de desejabilidade, métodos amplamente empregados em processos biológicos complexos por sua capacidade de representar efeitos lineares, quadráticos e interações de fatores (Rodrigues; Iemma, 2014; Djimtoingar *et al.*, 2022; Regalado *et al.*, 2021).

Apesar dos avanços, a literatura ainda carece de estudos que avaliem variáveis relacionadas à qualidade físico-química do efluente tratado, como turbidez e cor, frequentemente negligenciadas em comparação a indicadores clássicos como a demanda química de oxigênio (DQO). Esses parâmetros, embora não constituam objetivos finais do tratamento, atuam como indicadores complementares da eficiência do processo, por refletirem a remoção de matéria orgânica particulada e coloidal, sendo relevantes para a aceitabilidade ambiental e o potencial de reúso de efluentes agroindustriais. Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo otimizar a codigestão anaeróbia de dejetos suínos e água residuária do processamento da mandioca, avaliando as remoções de DQO, turbidez e cor em função

da proporção de dejetos suínos e do tempo de operação, por meio de delineamento composto central rotacional, análise de variância e função de desejabilidade.

Nesse contexto, o presente estudo contribui para o avanço do conhecimento ao propor a otimização da codigestão anaeróbia de dejetos suínos e água residuária do processamento da mandioca com foco em parâmetros estéticos e físico-químicos do efluente tratado, como turbidez e cor, variáveis ainda pouco exploradas na literatura quando comparadas a indicadores clássicos, como a demanda química de oxigênio. Adicionalmente, a aplicação de técnicas de planejamento experimental e modelagem matemática, por meio de delineamento composto central rotacional, análise de variância e função de desejabilidade, permite uma abordagem integrada para a identificação de condições operacionais ótimas, contribuindo para o aprimoramento de estratégias de tratamento de efluentes agroindustriais e ampliando as possibilidades de reúso ambientalmente seguro desses efluentes.

Este artigo está organizado em quatro seções. Na Seção 2, são descritos os materiais e métodos empregados na condução da pesquisa. A Seção 3 reúne os resultados obtidos e a respectiva discussão, com base no levantamento e sistematização dos dados. Por fim, a Seção 4 apresenta as considerações finais, destacando as principais conclusões do estudo.

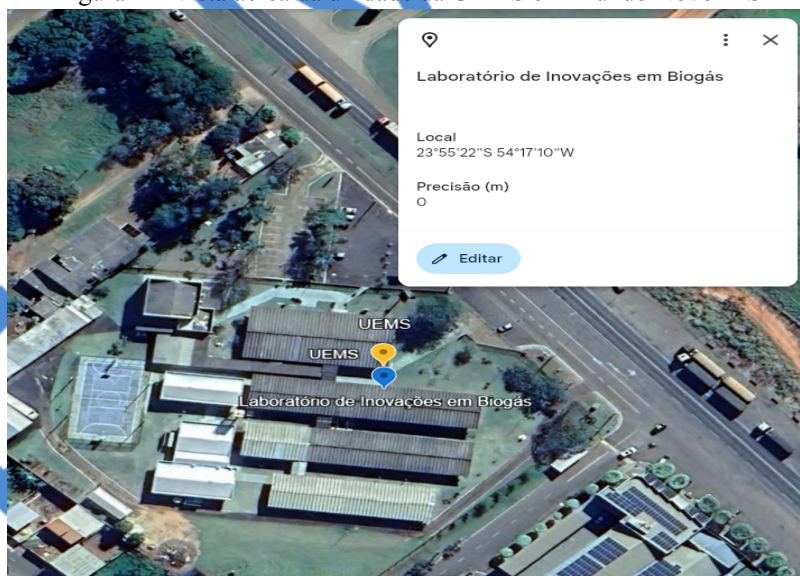
2 Material e métodos

Esta seção apresenta, de forma detalhada, os procedimentos metodológicos adotados na condução dos ensaios de codigestão anaeróbia, abrangendo a caracterização do local de estudo, a coleta, o armazenamento e o preparo dos substratos, a obtenção e a aclimação do inóculo, as condições operacionais do sistema experimental, os métodos analíticos empregados para o monitoramento e a avaliação do desempenho do processo e a modelagem matemática do sistema.

2.1 Local de estudo

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Inovações em Biogás da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil, localizado nas coordenadas geográficas 23°55'22" S e 54°17'10" W. A Figura 1 apresenta a localização da unidade experimental.

Figura 1 – Vista aérea da unidade da UEMS em Mundo Novo-MS



Fonte: Google Earth (2025)

2.2 Coleta e armazenamento dos substratos

Os substratos utilizados nos ensaios de codigestão anaeróbia foram dejetos suínos e água residuária proveniente do processamento da mandioca, sendo esta gerada especificamente na etapa de

lavagem e extração da fécula, coletados em unidades de suinocultura e em uma fecularia localizadas no município de Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil. A coleta foi realizada em recipientes plásticos higienizados de 20 L, devidamente vedados para transporte ao laboratório. Após a coleta, os substratos foram armazenados sob congelamento a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, condição empregada para preservar suas características físico-químicas e minimizar a degradação microbiológica até o momento da utilização nos ensaios experimentais.

2.3 Inóculo

O inóculo utilizado consistiu em lodo proveniente de um biodigestor anaeróbio empregado no tratamento da água residuária da produção de fécula de mandioca. Para cada condição de mistura definida no delineamento experimental, a biomassa foi previamente aclimatada durante 15 dias, a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, visando à adaptação da comunidade microbiana às características específicas dos substratos em cada ensaio experimental. As proporções utilizadas nesse processo foram estabelecidas com base em ensaios preliminares exploratórios, conduzidos previamente para identificar condições adequadas de adaptação.

2.4 Monitoramento do processo

O monitoramento dos níveis de acidez e alcalinidade foi realizado por meio de um pHmetro de bancada (pH Pro – Line Lab), com medições diárias ao longo de cada ensaio experimental. Sempre que necessário, o pH foi corrigido com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 6 mol L^{-1} ou solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 20% (v/v), de modo a mantê-lo próximo de 7,0, faixa considerada ideal para o crescimento e metabolismo de microrganismos anaeróbios, conforme citado no trabalho desenvolvido por Fleck *et al.* (2017). Esse controle buscou assegurar a estabilidade do meio reacional e a continuidade da atividade microbiológica durante todo o período experimental.

A turbidez foi determinada por meio de turbidímetro digital portátil, com faixa de medição de 0 a 1000 NTU, operando pelo princípio nefelométrico, conforme especificações do fabricante. A cor aparente do efluente foi analisada utilizando colorímetro portátil digital, adequado para medições em campo e laboratório, seguindo procedimentos baseados em leitura espectrofotométrica. A demanda química de oxigênio (DQO) foi determinada de acordo com os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017), empregando método colorimétrico após digestão em meio ácido.

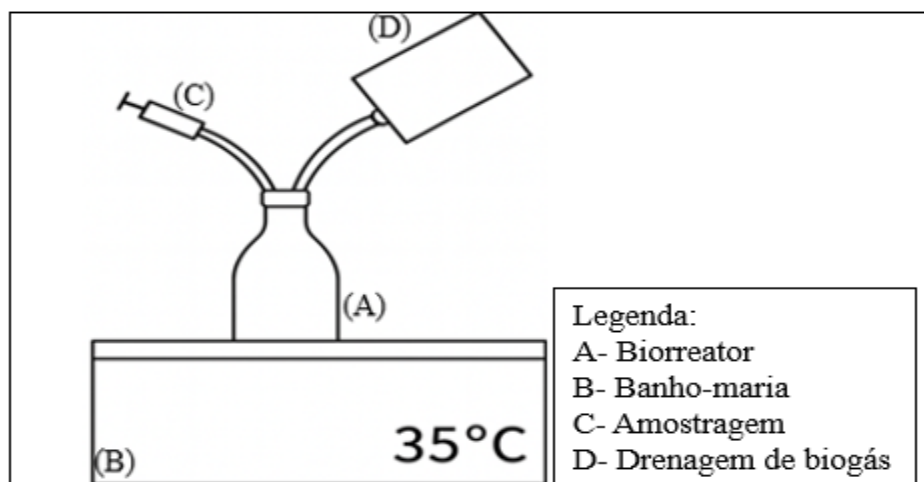
As variáveis demanda química de oxigênio (DQO), cor e turbidez foram consideradas variáveis resposta do estudo e utilizadas para a modelagem matemática e otimização do processo, enquanto o pH foi empregado exclusivamente como indicador de estabilidade operacional da codigestão anaeróbia.

2.5 Módulo experimental e coleta de amostras

Os ensaios foram conduzidos em um módulo experimental constituído por biorreatores de polietileno tereftalato (PET) transparente, com volume útil de 0,5 L, acondicionados em banho-maria digital (SP Labor) com controle termostático ajustado a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, ao longo de todo o período experimental, caracterizando condição mesofílica.

Os biorreatores foram operados em regime de batelada, sendo cada unidade equipada com abertura para coleta de amostras líquidas e ajuste de pH, bem como com um ponto específico destinado à drenagem de biogás, o qual não foi monitorado ou quantificado no presente estudo. A vedação dos reatores foi realizada com silicone, de modo a garantir a manutenção das condições de anaerobiose ao longo de todo o período experimental. Os ensaios foram conduzidos em sistemas fechados, sem monitoramento quantitativo da pressão interna ou da produção de biogás, uma vez que esses parâmetros não integraram o escopo da pesquisa. Eventuais liberações de gás foram realizadas exclusivamente para evitar acúmulo excessivo de pressão no sistema, não sendo observados problemas operacionais ou interferências no desempenho dos ensaios experimentais.

Figura 2 – Esquema do sistema experimental utilizado nos ensaios de codigestão anaeróbia em regime de batelada



Legenda: (A) Biorreator com volume útil de 0,5 L; (B) banho-maria com controle de temperatura a 35 °C; (C) ponto de coleta de amostras líquidas para ajuste de pH e realização das análises físico-químicas; (D) saída para drenagem de biogás.

Fonte: elaborada pelos autores

Amostras dos substratos foram coletadas no início e ao final de cada ensaio experimental, com o objetivo de determinar a eficiência de remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO). As análises de cor e turbidez foram realizadas em colorímetro de bancada e turbidímetro de bancada, respectivamente, enquanto a DQO foi determinada pelo Método 5220 D, descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017).

2.6 Preparo das amostras

Após a coleta, o dejetos suíno utilizado como substrato foi submetido à determinação de sólidos totais (ST), conforme metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). Aproximadamente 30 g de amostra foram pesados em triplicata, utilizando cadinhos previamente tarados, para determinação do peso úmido (PU). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante, possibilitando a determinação do peso seco (PS). O teor de umidade (U) e o teor de sólidos totais (ST) foram calculados por meio das Equações 1 e 2, conforme recomendação de Matos (2016):

$$U = \frac{PU-PS}{PU} \times 100 \quad (1)$$

$$ST = 100 - U \quad (2)$$

Em que: U é o teor de umidade, em %; PU é o peso úmido da amostra, em g; PS é o peso seco da amostra, em g; e ST é o teor de sólidos totais, em %.

A partir dos valores obtidos para o teor de sólidos totais, foi calculada a quantidade de água destilada a ser adicionada ao dejetos suíno, de modo a ajustar o substrato à concentração de 8% de ST, conforme Matos (2016). Esse ajuste visou padronizar a carga orgânica e favorecer o desempenho do processo de codigestão anaeróbia.

2.7 Planejamento experimental

As variáveis independentes controladas foram a proporção de dejetos suíno adicionado à água residuária do processamento da mandioca (%) e o tempo de operação (dias). Os efeitos dessas

variáveis sobre a eficiência de remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO) foram avaliados por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), que possibilitou a modelagem estatística dos dados e a otimização simultânea das respostas. Embora parâmetros relacionados aos sólidos sejam amplamente utilizados na avaliação de efluentes, as análises de turbidez e cor fornecem informações complementares, uma vez que estão associadas à presença de partículas finas, coloides e compostos orgânicos dissolvidos, os quais nem sempre são adequadamente representados pelas análises gravimétricas de sólidos. Além disso, turbidez e cor são parâmetros diretamente relacionados à aceitabilidade ambiental e ao potencial de reúso de efluentes tratados.

O delineamento foi estruturado a partir de um esquema fatorial 2^2 , complementado por quatro pontos axiais e três repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios experimentais. A definição dos níveis reais das variáveis independentes foi fundamentada em análises preliminares, de modo a garantir a relevância operacional do intervalo investigado. A Tabela 1 apresenta a matriz do delineamento experimental, contendo os valores codificados e reais dos fatores estudados.

Tabela 1 – Delineamento composto central rotacional

Ensaio experimental	Dejeto suíno codificado	Dejeto suíno real (%)	Tempo de operação codificado	Tempo de operação real (dias)
1	-1	28,72	-1	7,18
2	-1	28,72	1	17,82
3	1	71,28	-1	7,18
4	1	71,28	1	17,82
5	-1,41	20,00	0	12,50
6	1,41	80,00	0	12,50
7	0	50,00	-1,41	5,00
8	0	50,00	1,41	20,00
9	0	50,00	0	12,50
10	0	50,00	0	12,50
11	0	50,00	0	12,50

Fonte: dados da pesquisa

A produção de biogás não foi monitorada nem quantificada neste estudo, uma vez que o escopo experimental esteve restrito à avaliação da eficiência do tratamento do efluente e à modelagem matemática das variáveis resposta.

2.8 Geração dos modelos matemáticos

Para cada variável resposta avaliada (remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio), foi ajustado um modelo matemático de segunda ordem (quadrático), com base nos dados obtidos nos ensaios do delineamento experimental. O ajuste estatístico foi realizado por regressão múltipla, utilizando os valores codificados das variáveis independentes, considerando termos lineares, quadráticos e de interação entre os fatores. A significância dos coeficientes e a adequação dos modelos foram avaliadas por meio de análise de variância (ANOVA), adotando-se nível de significância de 10%, com auxílio de ferramenta computacional apropriada para análise estatística.

A forma geral da equação ajustada está apresentada na Equação 3:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (3)$$

Em que: Y é a variável resposta (remoção de cor, turbidez ou DQO); X_1 representa a proporção de dejeto suíno adicionado ao efluente de fecalária (codificada); X_2 representa o tempo de operação (codificado); β_0 é o coeficiente linear médio; β_1, β_2 são os coeficientes dos efeitos lineares; β_{11}, β_{22} são os coeficientes dos efeitos quadráticos; β_{12} é o coeficiente do efeito de interação entre os fatores.

2.9 Validação dos modelos matemáticos propostos e otimização simultânea

A validação dos modelos matemáticos foi realizada por meio de critérios estatísticos internos, incluindo análise de variância (ANOVA) e avaliação da significância dos coeficientes dos modelos, com base nos dados experimentais obtidos no delineamento composto central rotacional. As repetições no ponto central permitiram a estimativa do erro puro e a verificação da reprodutibilidade dos ensaios. Não foi realizada validação externa independente, uma vez que o objetivo do estudo esteve direcionado à modelagem empírica e à otimização do processo nas condições avaliadas.

A significância estatística dos modelos matemáticos ajustados foi avaliada por meio de análise de variância (ANOVA), considerando-se um nível de confiança de 90% ($p < 0,10$) para todas as variáveis resposta analisadas. Essa escolha permitiu verificar a adequação dos modelos em descrever os efeitos das variáveis independentes sobre as respostas avaliadas. A adoção de um nível de significância de 10% justifica-se pelo fato de a codigestão anaeróbia constituir um processo microbiológico complexo, caracterizado por elevada variabilidade experimental, decorrente das múltiplas interações entre microrganismos, substratos e condições operacionais. Em estudos de modelagem estatística aplicados a bioprocessos, a utilização de níveis de significância mais flexíveis é prática recorrente, uma vez que o objetivo central é capturar tendências relevantes e preservar a capacidade preditiva dos modelos, evitando a exclusão prematura de efeitos potencialmente significativos (Rodrigues; Iemma, 2014).

A otimização simultânea das variáveis resposta foi conduzida por meio da função de desejabilidade, conforme o método proposto por Derringer e Suich (1980), permitindo a identificação da combinação ótima das condições operacionais que maximiza o desempenho global do sistema de codigestão anaeróbia.

3 Resultados e discussões

Esta seção apresenta, de forma detalhada, os resultados de eficiência de remoção dos parâmetros turbidez, cor e DQO. De forma complementar, são apresentados os resultados relacionados a modelagem matemática do sistema de tratamento de resíduos empregado no presente estudo.

3.1 Eficiência de remoção de turbidez

A turbidez é um parâmetro crítico na avaliação da qualidade de efluentes tratados, por refletir a presença de sólidos suspensos e coloidais que podem comprometer processos subsequentes ou gerar impacto ambiental quando lançados em corpos hídricos. No presente estudo, a eficiência variou entre 30,86% e 76,10%, evidenciando forte influência da composição dos substratos sobre o desempenho do processo (Tabela 2).

Tabela 2 – Eficiência de remoção de turbidez

Ensaio experimental	Dejeto suíno (%)	Tempo de operação (dias)	Efluente bruto (NTU)	Efluente tratado (NTU)	Eficiência de remoção de turbidez (%)
1	28,72	7,18	3550,00	979,00	72,42
2	28,72	17,82	1970,00	739,50	62,46
3	71,28	7,18	1880,00	927,00	50,69
4	71,28	17,82	3330,00	1065,00	68,02
5	20,00	12,50	3065,00	996,50	67,49
6	80,00	12,50	2155,00	1490,00	30,86
7	50,00	5,00	1995,00	958,00	51,98
8	50,00	20,00	3830,00	1130,00	70,50
9	50,00	12,50	4160,00	1175,00	71,75
10	50,00	12,50	4665,00	1115,00	76,10
11	50,00	12,50	3865,00	1185,00	69,34

Fonte: dados da pesquisa

Os melhores resultados ocorreram em proporções intermediárias de dejeto suíno (50%) associadas a tempos médios de operação (12,5 dias), condição em que o sistema apresentou elevada estabilidade e reprodutibilidade, como demonstrado pelos ensaios centrais do DCCR. Em contraste,

cargas mais elevadas ($\geq 70\%$ de dejetos) reduziram a eficiência, possivelmente em função da sobrecarga orgânica e da maior concentração de sólidos, que dificultaram tanto a sedimentação quanto a atividade microbiana.

A ocorrência das maiores eficiências de remoção de turbidez em proporções intermediárias de dejetos suínos (50%) é estatisticamente sustentada pela significância dos termos linear e quadrático associados a esse fator na análise de variância. Esse comportamento evidencia a existência de um ponto ótimo no interior do domínio experimental, característico de sistemas modelados por delineamento composto central rotacional. O tempo de operação, embora não tenha apresentado efeito isolado significativo, contribui para a definição da região ótima quando analisado de forma conjunta, sendo as maiores remoções observadas em tempos médios de operação (12,5 dias), compatíveis com a região central do planejamento experimental.

A inclusão da turbidez como variável resposta neste estudo representa uma abordagem inédita na codigestão de dejetos suínos com água residuária da mandioca. Embora Glanpracha e Annachhatre (2016) tenham demonstrado bom desempenho na degradação de matéria orgânica e estabilidade do processo com polpa de mandioca, a clarificação do efluente ainda não havia sido explorada. Assim, ao considerar a turbidez, este trabalho amplia a compreensão sobre a qualidade final do efluente tratado e reforça seu potencial para aplicações práticas, como o reúso agrícola ou a disposição ambientalmente segura.

Nesse contexto, diferentes tecnologias de pós-tratamento têm sido investigadas especificamente para melhorar a clarificação de efluentes oriundos de processos anaeróbios, incluindo sistemas de filtração em série, que visam reduzir turbidez e material particulado residual, tornando o efluente mais adequado ao lançamento ou reúso (Silva *et al.*, 2019). Assim, os resultados obtidos neste estudo (Tabela 2) sustentam que a codigestão pode atuar como etapa central de estabilização e remoção, enquanto operações de polimento podem ser consideradas quando o objetivo for elevar o grau de clarificação final do efluente.

Além do aspecto ambiental, a turbidez elevada em efluentes de origem suinícola, mesmo após digestão anaeróbia, pode impor limitações operacionais a usos posteriores, como processos biológicos complementares (por exemplo, cultivo de microalgas ou outras etapas que dependem de penetração de luz), reforçando a necessidade de redução de turbidez quando se busca valorização do efluente tratado (He *et al.*, 2025). Essa discussão reforça a relevância de considerar turbidez como variável resposta, pois ela traduz um atributo prático do efluente que nem sempre é capturado por indicadores clássicos isolados.

3.2 Eficiência de remoção de cor

A remoção de cor é um indicador relevante da qualidade de efluentes agroindustriais, refletindo a presença de compostos cromóforos solúveis. No presente estudo, as eficiências variaram entre 38,46% e 93,30% (Tabela 3), com desempenho superior em condições intermediárias (50% dejetos suínos, 12,5 dias), definindo uma zona ótima operacional. Em geral, a remoção de cor superou a de turbidez, sugerindo maior degradabilidade dos cromóforos solúveis em comparação às partículas em suspensão.

Tabela 3 – Eficiência de remoção de cor

Ensaio experimental	Dejetos suínos (%)	Tempo de operação (dias)	Efluente bruto (PCU)	Efluente tratado (PCU)	Eficiência de remoção de cor (%)
1	28,72	7,18	850,00	400,00	52,94
2	28,72	17,82	450,00	250,00	44,44
3	71,28	7,18	950,00	300,00	68,42
4	71,28	17,82	4350,00	450,00	89,66
5	20,00	12,50	600,00	300,00	50,00
6	80,00	12,50	900,00	500,00	44,44
7	50,00	5,00	650,00	400,00	38,46
8	50,00	20,00	750,00	400,00	46,67

9	50,00	12,50	8950,00	600,00	93,30
10	50,00	12,50	7550,00	550,00	92,72
11	50,00	12,50	7100,00	550,00	92,25

Fonte: dados da pesquisa

Embora estudos específicos envolvendo a codigestão de dejetos suínos com água residuária de mandioca, nas condições operacionais abordadas no presente estudo, ainda não explorem a cor como métrica, a literatura indica que a utilização de aditivos como biochar e zeólita pode melhorar o desempenho da codigestão de resíduos de mandioca (Achi *et al.*, 2024). Esses dados reforçam a relevância de ajustes operacionais e o possível uso de aditivos para potencializar a eficiência do processo.

Os resultados deste estudo indicam que a codigestão anaeróbia de dejetos suínos e água residuária de mandioca é eficaz na atenuação da coloração, o que aumenta sua aceitabilidade visual e potencial de reúso. No entanto, para atender padrões mais restritivos, etapas adicionais de polimento podem ser necessárias para remover a turbidez residual, conforme os resultados previamente apresentados na Tabela 2.

A eficiência de remoção de cor observada no presente estudo, com valores máximos superiores a 93%, está de acordo com achados de trabalhos anteriores que também relatam elevada remoção de cor em processos anaeróbios de tratamento de efluentes. Em sistemas anaeróbios aplicados a efluentes têxteis, remoções de cor da ordem de 86% foram registradas em reatores biológicos operados em diferentes tempos de retenção hidráulica, indicando que a coloração pode ser significativamente atenuada por degradação e processos de adsorção em lodos anaeróbios (Oktem; Palabiyin; Selcuk, 2019).

3.3 Eficiência de remoção de DQO

A eficiência de remoção de DQO variou de 6,11% a 80,99% (Tabela 4), refletindo a influência direta das condições operacionais sobre o desempenho do processo. O maior valor (80,99%) foi obtido com 80% de dejetos suínos e 12,5 dias de operação, evidenciando que cargas orgânicas elevadas, quando associadas a um tempo de retenção adequado, favorecem a atividade microbiológica responsável pela degradação da matéria orgânica. Em contrapartida, em condições de baixa carga e tempo reduzido, como no ensaio experimental 1 (28,72% de dejetos e 7,18 dias), a remoção foi mínima (6,11%), reforçando a importância do tempo de estabilização para assegurar a eficiência do processo.

Tabela 4 – Eficiência de remoção de DQO

Ensaio experimental	Dejetos suínos (%)	Tempo de operação (dias)	Efluente bruto (mg/L)	Efluente tratado (mg/L)	Eficiência de remoção de DQO (%)
1	28,72	7,18	9223,80	8660,14	6,11
2	28,72	17,82	9717,00	5982,76	38,43
3	71,28	7,18	17819,62	3939,49	77,89
4	71,28	17,82	7180,53	3666,46	48,94
5	20,00	12,50	19369,68	11830,73	38,92
6	80,00	12,50	4784,98	909,82	80,99
7	50,00	5,00	5207,72	3643,91	30,03
8	50,00	20,00	8519,23	2671,25	68,64
9	50,00	12,50	7955,57	3732,69	53,08
10	50,00	12,50	9505,63	3707,33	61,00
11	50,00	12,50	4996,35	3305,37	33,84

Fonte: dados da pesquisa

As diferenças observadas entre ensaios experimentais com mesma proporção de dejetos, mas tempos distintos (ensaios experimentais 3 e 4), confirmam o papel crítico do tempo de retenção no equilíbrio do consórcio microbiano e na manutenção da estabilidade operacional. Já os ensaios experimentais conduzidos com 50% de dejetos apresentaram variações consideráveis (30,03% a

68,64%), indicando forte interação entre carga orgânica e tempo de operação, o que evidencia um comportamento não linear dos resultados. Essa resposta complexa justifica a adoção do delineamento composto central rotacional (DCCR), capaz de capturar efeitos quadráticos e interações entre fatores, fornecendo uma base estatística robusta para a construção de modelos preditivos.

Resultados similares são observados por Fleck *et al.* (2017), que aplicaram DCCR para otimizar remoção de DQO em água residuária do processamento de mandioca, alcançando eficiência superior a 90%. Em linha teórica, a revisão de Kadam *et al.* (2024) destaca os benefícios da codigestão anaeróbia de diferentes substratos, o que foi alvo da pesquisa desenvolvida, destacando a maior estabilidade do sistema operacional e a possível eficiência ampliada.

Esses resultados evidenciam que a codigestão anaeróbia apresenta elevado potencial para a redução da carga orgânica, medida pela DQO, configurando-se como uma estratégia eficiente de tratamento preliminar de efluentes agroindustriais. A obtenção de eficiências superiores a 70% em determinadas condições operacionais indica que o processo pode contribuir para o atendimento aos limites estabelecidos por legislações ambientais de diferentes países. Ademais, a aplicação de metodologias estatísticas robustas, associada à identificação de parâmetros operacionais críticos, fornece subsídios técnicos consistentes para o escalonamento do processo para níveis industriais, bem como para sua integração a sistemas complementares de polimento, garantindo maior conformidade ambiental e sustentabilidade no manejo de resíduos orgânicos agroindustriais.

Estudos sobre o tratamento de efluentes por digestão anaeróbia indicam que a remoção de matéria orgânica expressa pela DQO é largamente dependente das condições operacionais, como tempo de retenção hidráulica e temperatura aplicada no biodigestor anaeróbio. Em diferentes sistemas anaeróbios, remoções de DQO na faixa de 60% a 85% têm sido relatadas em efluentes de alta carga orgânica (Carvalho Filho *et al.*, 2024), ilustrando que a eficiência de redução pode variar conforme o tipo de resíduo, o regime de operação e a composição do substrato, o que corrobora as tendências observadas neste estudo.

3.4 Modelagem matemática

Os modelos matemáticos ajustados permitiram identificar os efeitos lineares, quadráticos e de interação das variáveis percentagem de dejetos suíno (DS) e tempo de operação (TO) sobre as eficiências de remoção de turbidez (Equação 4), cor (Equação 5) e DQO (Equação 6).

$$\text{Remoção de Turbidez (\%)} = 72,36 - 8,50 \text{ DS} - 9,28 \text{ DS}^2 + 4,20 \text{ TO} - 3,51 \text{ TO}^2 + 6,82 \text{ DS} \times \text{TO} \quad (4)$$

$$\text{Remoção de Cor (\%)} = 92,68 + 6,63 \text{ DS} - 18,02 \text{ DS}^2 + 3,05 \text{ TO} - 20,36 \text{ TO}^2 + 7,44 \text{ DS} \times \text{TO} \quad (5)$$

$$\text{Remoção de DQO (\%)} = 49,35 + 17,75 \text{ DS} + 2,36 \text{ DS}^2 + 7,25 \text{ TO} - 2,99 \text{ TO}^2 - 15,32 \text{ DS} \times \text{TO} \quad (6)$$

Em que: DS corresponde ao percentual de dejetos suíno (valor codificado); TO corresponde ao tempo de operação, em dias (valor codificado).

O modelo de remoção de turbidez apresentou influência negativa de DS nos termos linear (-8,50) e quadrático (-9,28), o que sugere que o aumento do dejetos pode aumentar a concentração de sólidos em suspensão. O TO influenciou positivamente, especialmente pelo termo linear (+4,20), e a interação DS × TO também teve contribuição positiva (+6,82), indicando que o tempo pode compensar o aumento da turbidez associado ao maior teor de dejetos.

Para a remoção de cor, os coeficientes revelaram comportamento mais complexo. O termo quadrático de DS (-18,02) e de TO (-20,36) foram negativos e expressivos, sugerindo que tanto excesso de carga quanto longos tempos podem dificultar a remoção eficiente. A interação positiva (+7,44) aponta que, em certas proporções, a combinação de DS e TO pode ser benéfica.

No modelo matemático para a remoção de DQO, se observa que o efeito linear de DS (+17,75) destacou-se como o principal fator positivo, indicando que o aumento do aporte orgânico contribui para maior degradação da matéria orgânica. O TO também influenciou positivamente (+7,25), mas com efeito quadrático negativo (-2,99), sugerindo que tempos excessivos podem comprometer o desempenho. A interação negativa entre DS e TO (-15,32) indica que altos valores simultâneos dessas variáveis podem gerar instabilidade no processo.

3.5 Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) possibilitou a identificação dos fatores experimentais com maior impacto sobre as variáveis resposta avaliadas (Tabela 5). Para a turbidez, tanto o efeito linear (p-valor 0,037) quanto o quadrático (p-valor 0,045) do percentual de dejetos suíno (DS) foram estatisticamente significativos ($p < 0,1$), indicando que a composição do substrato exerce influência direta e não linear sobre esse parâmetro. O tempo de operação (TO), por sua vez, não apresentou efeito significativo, sugerindo que a turbidez é mais sensível à carga orgânica aplicada do que ao tempo de retenção hidráulica.

No caso da cor, observaram-se efeitos significativos nos termos quadráticos de DS (p-valor 0,047) e TO (p-valor 0,031), demonstrando que ambos os fatores influenciam de forma não linear a remoção dos compostos cromóforos. Esse resultado indica a existência de faixas ótimas de operação, nas quais se obtém maior eficiência, enquanto condições extremas podem comprometer o desempenho do processo. Os termos lineares e a interação entre as variáveis não apresentaram significância estatística, o que sugere que a resposta da cor depende mais da curvatura da superfície de resposta do que de efeitos diretos ou combinados.

Tabela 5 – Análise de variância para turbidez, cor e DQO

Turbidez				
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	p-valor
DS (L)	576,63	1	576,63	0,037*
DS (Q)	513,92	1	513,92	0,045*
TO (L)	140,56	1	140,56	0,223
TO (Q)	69,00	1	69,00	0,375
DS x TO	186,19	1	186,19	0,171
Resíduo	364,33	5	72,87	
Total	1.850,63	10		
Cor				
DS (L)	350,32	1	350,32	0,302
DS (Q)	1.819,58	1	1.819,58	0,047*
TO (L)	74,13	1	74,13	0,619
TO (Q)	2.323,07	1	2.323,07	0,031*
DS x TO	221,12	1	221,12	0,403
Resíduo	1.324,34	5	264,87	
Total	6.112,56	10		
DQO				
DS (L)	2.514,11	1	2.514,11	0,018*
DS (Q)	31,10	1	31,10	0,718
TO (L)	419,00	1	419,00	0,219
TO (Q)	49,93	1	49,93	0,648
DS x TO	938,50	1	938,50	0,089*
Resíduo	1.061,57	5	212,31	
Total	5.014,21	10		

* Estatisticamente significativo a 10% de significância; DS (L) – percentual de dejetos suíno, termo linear; DS (Q) – percentual de dejetos suíno, termo quadrático; TO (L) – tempo de operação em dias, termo linear; TO (Q) – tempo de operação em dias, termo quadrático.
Fonte: dados da pesquisa

Para a DQO, o efeito linear de DS foi estatisticamente significativo (p-valor 0,018), confirmando que o aumento da fração de dejetos suíno exerce papel determinante na remoção da carga orgânica. Além disso, a interação entre DS e TO também foi significativa ao nível de 10% (p-valor 0,089), indicando a existência de sinergia entre os fatores. Esse resultado reforça a importância da avaliação simultânea da composição do substrato e do tempo de operação na definição de condições operacionais mais robustas, uma vez que a eficiência de remoção da matéria orgânica não depende apenas de efeitos isolados, mas também da interação entre variáveis do sistema.

De modo integrado, os resultados da ANOVA revelam que o percentual de dejetos suíno foi o fator de maior impacto sobre as variáveis resposta, influenciando linear e quadraticamente a turbidez, apresentando efeito quadrático em conjunto com o tempo de operação na remoção de cor, e afetando a DQO de forma linear, além de interagir com o tempo de operação ao nível de 10% de significância. Essa diferenciação de respostas entre os parâmetros confirma a complexidade do sistema de codigestão anaeróbia, conforme destacado no trabalho desenvolvido por Tomczak, Daniluk e Kujawska (2024), justificando o uso de delineamentos estatísticos multifatoriais, capazes de identificar regiões ótimas de operação e fornecer suporte para a modelagem preditiva e a otimização do processo.

3.6 Validação estatística dos modelos matemáticos

A validação dos modelos matemáticos foi conduzida via ANOVA, adotando nível de significância de 10%. Laskar *et al.* (2023), corroborado por Assis *et al.* (2023), evidenciam em seus estudos que a validação de um modelo matemático possui elevada importância científica, pois comprova a capacidade do modelo matemático em descrever satisfatoriamente o processo executado, a exemplo da codigestão anaeróbia.

Conforme apresentado na Tabela 6, os p-valores observados (turbidez com 0,074; cor com 0,092 e DQO com 0,088) indicam que os modelos são estatisticamente significativos no critério adotado (10%), demonstrando que a variabilidade explicada pela regressão supera a variação residual. Esses resultados atestam a adequação dos modelos para descrever as variáveis resposta em função dos fatores operacionais e fortalecer sua aplicabilidade em análises preditivas.

Tabela 6 – Validação estatística dos modelos matemáticos

Turbidez				
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	p-valor
Regressão	1.486,30	5	297,26	0,074*
Resíduos	364,33	5	72,87	
Total	1.850,63	10		
Cor				
Regressão	4.788,22	5	957,64	0,092*
Resíduos	1.324,34	5	264,87	
Total	6.112,56	10		
DQO				
Regressão	3.952,64	5	790,53	0,088*
Resíduos	1.061,57	5	212,31	
Total	5.014,21	10		

* Estatisticamente significativo com um nível de significância de 10%.

Fonte: dados da pesquisa

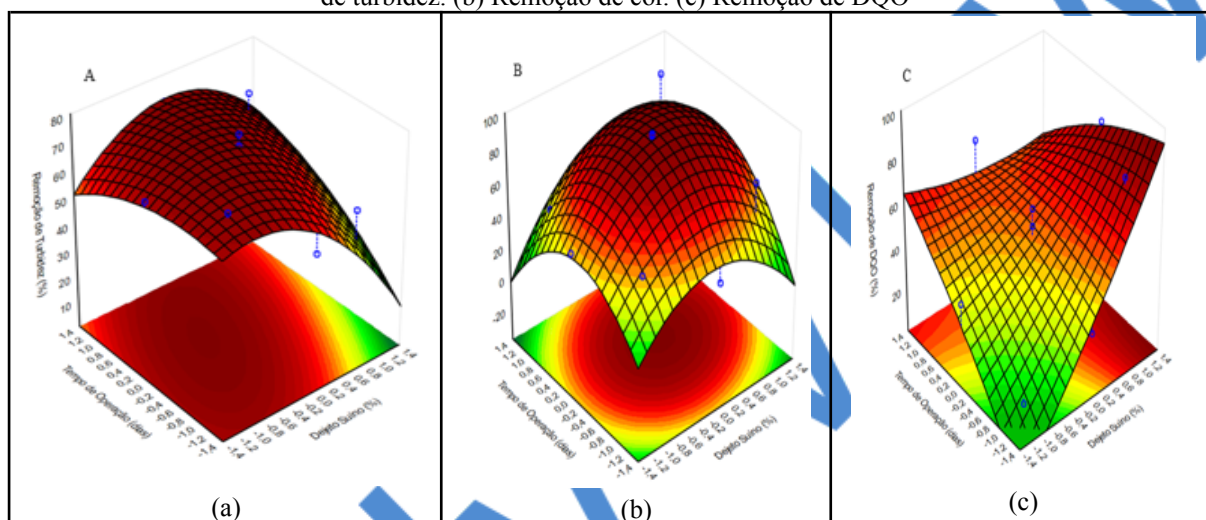
Adicionalmente, constatou-se que os modelos estatísticos ajustados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) de 0,80, 0,74 e 0,79 para as respostas de remoção de turbidez, cor e DQO, respectivamente. Os valores de R^2 ajustado foram de 0,59 para turbidez, 0,49 para cor e 0,58 para DQO, indicando adequada capacidade explicativa dos modelos dentro da região experimental avaliada. Ressalta-se que a variabilidade observada, especialmente para a variável cor, está associada à complexidade do processo de codigestão anaeróbia e à natureza multifatorial das interações

envolvidas, sendo os modelos considerados apropriados para a análise dos efeitos dos fatores e para a otimização das respostas.

3.7 Gráficos de superfície de resposta

As superfícies de resposta obtidas para turbidez, cor e DQO confirmam o comportamento não linear previamente identificado pelos modelos matemáticos e pela análise de variância. Para a remoção de turbidez (Figura 3a), observa-se uma superfície com curvatura acentuada em função do percentual de dejetos suíno (DS), na qual as condições intermediárias de DS favoreceram maiores eficiências, enquanto proporções extremas resultaram em redução do desempenho. Esse comportamento corrobora a significância estatística dos efeitos linear e quadrático de DS e evidencia a existência de uma faixa operacional ótima para esse parâmetro.

Figura 3 – Superfícies de resposta para as variáveis estudadas em função dos fatores operacionais. (a) Remoção de turbidez. (b) Remoção de cor. (c) Remoção de DQO



Fonte: elaborado pelos autores

No gráfico referente à remoção de cor (Figura 3b), a superfície apresenta uma clara forma parabólica invertida, destacando a existência de uma região ótima de operação entre níveis intermediários de DS e tempo de operação. Essa resposta está em consonância com os efeitos quadráticos significativos de ambas as variáveis, evidenciando que o desempenho máximo depende do equilíbrio entre carga orgânica e tempo de retenção.

Já para a remoção de DQO (Figura 3c), a superfície é levemente inclinada, sugerindo aumento contínuo da eficiência com o aumento da proporção de dejetos suíno e, em menor grau, do tempo de operação. O formato da superfície é compatível com o forte efeito linear de DS e a interação significativa com TO, reforçando que o aprimoramento do processo está condicionado a ajustes combinados dos dois fatores operacionais.

Essas superfícies reforçam a aplicabilidade dos modelos ajustados para prever e otimizar a eficiência do processo de codigestão anaeróbia, permitindo a definição de zonas operacionais mais estáveis e eficazes para cada variável resposta. A aplicabilidade da metodologia de superfície de resposta (MSR) na otimização de processos biológicos é bem documentada na literatura. Por exemplo, Djimtoingar *et al.* (2022) revisaram múltiplos estudos que empregaram MSR em processos de tratamento anaeróbio de resíduos, destacando sua eficácia para aumentar biodegradabilidade, remoção de matéria orgânica e qualidade de biogás produzido. Isso reforça a escolha metodológica em seu estudo e a robustez estatística dos modelos derivados.

3.8 Aplicação da função de desejabilidade

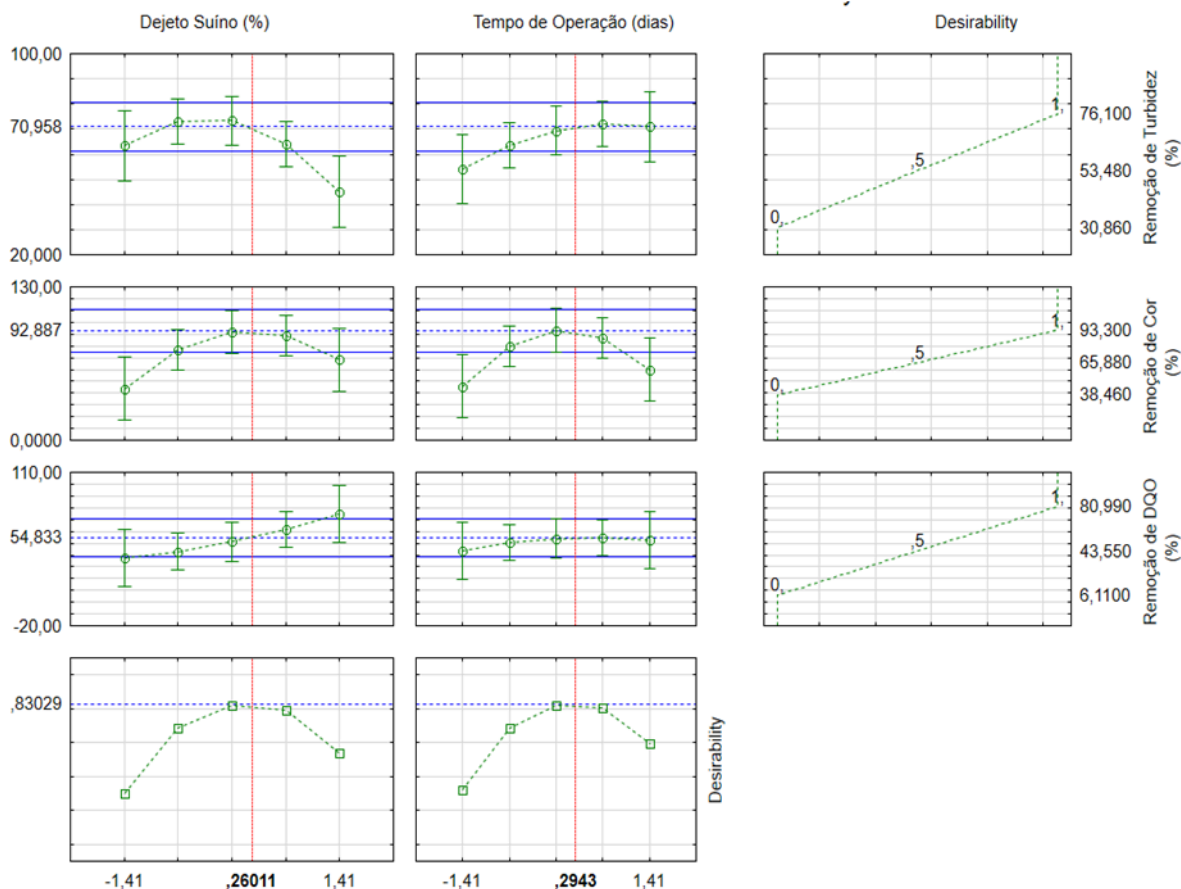
A função de desejabilidade mostrou-se eficaz na identificação das condições operacionais ótimas para maximizar simultaneamente a eficiência de remoção de turbidez, cor e DQO pelo processo de codigestão anaeróbia (Figura 4). Esse tipo de abordagem é também observado em outros contextos científicos: por exemplo, Ugwu *et al.* (2022) aplicaram a função de desejabilidade para otimizar parâmetros em um processo de biometanação; enquanto Regalado *et al.* (2021) empregaram esse método na otimização da codigestão anaeróbia visando melhorar a produção de biogás por meio de várias variáveis operacionais. Estudos comparáveis como o de Bensegueni *et al.* (2025), confirmam que ajustes finos de parâmetros operacionais geram alta eficiência em sistemas que utilizam metodologia de superfície de resposta.

Nesse contexto, no presente estudo a análise da função de desejabilidade permitiu identificar as condições operacionais ótimas para maximizar simultaneamente a remoção de turbidez, cor e DQO no processo de codigestão anaeróbia (Figura 4). O ponto ótimo foi alcançado com aproximadamente 0,26011 para o percentual de dejetos suíno e 0,2943 para o tempo de operação, ambos expressos em valores codificados do planejamento experimental. Nessa condição, a função de desejabilidade global atingiu 0,83029, valor considerado elevado para processos ambientais com múltiplas variáveis respostas.

Nessas condições, os valores previstos para as variáveis respostas foram: 76,10% de remoção de turbidez, 93,30% de remoção de cor e 80,99% de remoção de DQO, indicando que o sistema pode atingir alto desempenho simultâneo com ajustes operacionais relativamente simples. A superfície da função de desejabilidade também evidencia comportamento parabólico em relação às duas variáveis, sugerindo que desvios significativos desses pontos ótimos podem comprometer a eficiência global do sistema.

Assim, os resultados confirmam a aplicabilidade do modelo proposto para orientar a operação de sistemas de codigestão anaeróbia com foco em múltiplos objetivos, contribuindo para a eficiência ambiental do processo e o aproveitamento sinérgico dos resíduos utilizados.

Figura 4 – Efeitos principais, superfícies de resposta e função de desejabilidade obtidos pelo DCCR



Legenda: Os gráficos de desejabilidade representam a resposta global do processo, considerando simultaneamente as variáveis avaliadas, sendo a função de desejabilidade expressa em escala adimensional (0–1). As linhas tracejadas indicam os valores médios previstos pelo modelo, enquanto os pontos representam os valores experimentais observados.

Fonte: elaborada pelos autores

4 Considerações finais

Os resultados obtidos demonstram que a codigestão anaeróbia de dejetos suínos e água residuária do processamento da mandioca é tecnicamente viável para a melhoria da qualidade do efluente tratado, promovendo reduções simultâneas de demanda química de oxigênio (DQO), turbidez e cor. As maiores eficiências de remoção foram observadas em condições operacionais intermediárias, especialmente na faixa de 50% de dejetos suínos associada a tempos de operação próximos a 12,5 dias, evidenciando a importância do equilíbrio entre carga orgânica e tempo de retenção para o desempenho do processo.

A análise dos resultados indicou que o percentual de dejetos suínos exerceu influência determinante sobre as variáveis resposta, afetando de forma linear e quadrática a remoção de turbidez, apresentando comportamento não linear na remoção de cor e atuando como principal fator positivo na remoção de DQO. O tempo de operação, por sua vez, mostrou-se relevante principalmente em interação com a proporção de dejetos, reforçando que o desempenho do processo é resultado da combinação entre os fatores operacionais e não de seus efeitos isolados.

A modelagem estatística por regressão quadrática associada ao delineamento composto central rotacional (DCCR) permitiu descrever adequadamente o comportamento das variáveis resposta, sendo confirmada por meio da análise de variância e da validação estatística interna dos modelos. Os modelos ajustados mostraram-se estatisticamente significativos ao nível de 10% de significância, evidenciando sua capacidade de representar o sistema estudado e de subsidiar análises preditivas dentro do intervalo experimental avaliado.

A aplicação da função de desejabilidade possibilitou a otimização simultânea das respostas, identificando uma condição operacional ótima caracterizada por valores codificados de 0,26011 para a proporção de dejetos suíno e 0,2943 para o tempo de operação, resultando em desejabilidade global elevada (0,83029). Nessas condições, observaram-se eficiências máximas de remoção de 80,99% para DQO, 93,30% para cor e 76,10% para turbidez, confirmando o potencial da abordagem integrada de codigestão e modelagem estatística para o tratamento de efluentes agroindustriais.

De forma geral, os resultados indicam que a integração entre codigestão anaeróbia e ferramentas de planejamento experimental constitui uma estratégia eficiente para a definição de faixas operacionais robustas, com potencial de aplicação em sistemas similares. Estudos futuros podem avançar na avaliação da produção de biogás, no uso de aditivos e no escalonamento do processo, de modo a ampliar a compreensão do sistema e consolidar sua aplicação em escala piloto e real.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul e à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT – Termo de Outorga 008/2022).

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

MELO NETO, J. D.: realização do estudo; análise e interpretação dos dados. **MELO, V. L. F. D.:** realização do estudo; análise e interpretação dos dados. **FLECK, L. F.:** concepção do estudo; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ACHI, C. G.; KUPOLATI, W. K.; SNYMAN, J.; NDAMBUKI, J. M.; FAMESO, F. O. Investigating the effects of biochars and zeolites in anaerobic digestion and co-digestion of cassava wastewater with livestock manure. **Frontiers in Energy Research**, v. 12, n. 1, 1386550, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1386550>.

AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. O processo de biodigestão. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. (ed.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 13-26.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA: AWWA: WEF, 2017.

ASSIS, G. P.; OCAMPOS, V. O.; FLECK, I. M.; FLECK, L. Modelagem matemática do tratamento de soro de leite por biodigestão anaeróbia. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 25, n. 2, p. 39-50, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2023v25n2p39-50>.

BENSEGUENI, C.; KHEIREDDINE, B.; KHALFAOUI, A.; AMROUCI, Z.; BOUZNADA, M. O.; DERBAL, K. Optimization of biogas and biomethane yield from anaerobic conversion of pepper

waste using response surface methodology. **Sustainability**, v. 17, n. 6, 2688, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17062688>.

CARVALHO FILHO, R.; SIMÕES, A. L. G.; SCANDELA, A. P. J.; MIOTO, L. S.; FREITAS, P. S. L.; ARAÚJO, M. L.; GIMENES, M. L.; VARESCHINI, D. T. Anaerobic digestion of vinasse improves its use as a liquid fertilizer. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 1, p. 474-509, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-027>.

COLIN, X.; FARINET, J.-L.; ROJAS, O.; ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 8, p. 1602-1607, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.020>.

DERRINGER, G. C.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several responses variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214-219, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.

DJIMTOINGAR, S. S.; DERKYI, N. S. A.; KURANCHIE, F. A.; YANKYERA, J. K. A review of response surface methodology for biogas process optimization. **Cogent Engineering**, v. 9, n. 1, 2115283, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2115283>.

DUPONT, G. K.; DELLA-FLORA, I. K.; CLERECI, N. J.; SERAFINI, C. G.; HOFFMANN, J. I.; WELTER, N.; PORTA, P. G. D.; WEBER, P. F. Co-digestão anaeróbica de dejetos de animais e resíduos lignocelulósicos: uma revisão do potencial de produção de metano. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 71901-71909, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-584>.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E.; ANDRADE, M. A. M.; FRARE, L. M. Optimization of anaerobic treatment of cassava processing wastewater. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 3, p. 574-590, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p574-590/2017>.

GLANPRACHA, N.; ANNACHHATRE, A. P. Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 112-121, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.079>.

GONZÁLEZ, R.; PEÑA, D. C.; GÓMEZ, X. Anaerobic co-digestion of wastes: reviewing current status and approaches for enhancing biogas production. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, 8884, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12178884>.

GOOGLE EARTH. **Vista aérea da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), unidade de Mundo Novo, MS**. Coordenadas: 23°55'22"S; 54°17'10"W. Mountain View: Google Earth, 2025. Disponível em: <https://earth.google.com/>. Acesso em: 20 mar. 2026.

HE, T.; PENG, Q.; QIAN, J.; WEI, L.; HAN, P.; LOU, Q. A comparative study on various pretreatment methods of anaerobic digestion piggery effluent for microalgae cultivation. **Processes**, v. 13, n. 9, 2703, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13092703>.

IBARRA-ESPARZA, F. E.; GONZÁLES-LÓPEZ, M. E.; SENÉS-GUERRERO, C.; CHONG, J. P. J.; FORRESTER, S.; GRADILLA-HERNÁNDEZ, M. S. Anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes: a systematic review focused on feedstock physicochemical parameter optimization. **Biomass and Bioenergy**, v. 206, 108671, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108671>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2024 registra recorde no abate de bovinos, frangos e suínos. **Agência de Notícias IBGE**, 18 mar. 2025a. Disponível em:

<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42898-2024-registra-recorde-no-abate-de-bovinos-frangos-e-suinos>. Acesso em: 9 jul. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Com alta recorde da agropecuária, PIB fecha 2023 em 2,9%. **Agência de Notícias IBGE**, 1 mar. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39306-com-alta-recorde-da-agropecuaria-pib-fecha-2023-em-2-9>. Acesso em: 20 mar. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE prevê safra de 322,6 milhões de toneladas para 2025, com crescimento de 10,2% frente a 2024. **Agência de Notícias IBGE**, 14 jan. 2025b. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42436-ibge-preve-safra-de-322-6-milhoes-de-toneladas-para-2025-com-crescimento-de-10-2-frente-a-2024>. Acesso em: 9 jul. 2025.

KADAM, R.; JO, S.; LEE, J.; KHANTHONG, K.; JANG, H.; PARK, J. A review on the anaerobic co-digestion of livestock manures in the context of sustainable waste management. **Energies**, v. 17, n. 3, 546, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030546>.

LASKAR, A. A.; AHMED, M.; KHAN, A. S.; SAMIR, M. Experimental investigation and statistical validation of mathematical models for hot air drying traits of carrot. **Food Science and Technology International**, v. 29, n. 4, p. 345-360, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/10820132221093264>.

MATOS, C. F. **Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016. 66 p. Disponível em: <https://rima.ufrrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/13266/3/2016%20-%20Camila%20Ferreira%20Matos.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2026.

OKTEM, Y. A.; PALABIYIK, B. B.; SELCUK, H. Removal of colour and organic matter from textile wastewaters using two anaerobic processes. **Desalination and Water Treatment**, v. 172, p. 229-234, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24756>.

PANIAGUA, C. E. S.; SANTOS, V. O. Potencialidade do uso de dejetos suínos como biofertilizante, biogás e energia elétrica: da redução de custos na produção ao manejo ecologicamente mais sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 90227-90243, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-266>.

REGALADO, R. E. H.; WEIDE, T.; BAUMKÖTTER, D.; WETTWER, L.; HÄNER, J.; BRÜGGING, E.; TRÄNCKNER, J. Optimization and analysis of liquid anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes via mixture design. **Processes**, v. 9, n. 5, 877, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9050877>.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos**. 3. ed. Campinas: Cárita, 2014.

SCHMIDT, V. K. O.; VASCONCELOS, G. M. D.; VICENTE, R.; CARVALHO, J. S.; DELLA-FLORA, I. K.; DEGANG, L.; OLIVEIRA, D.; ANDRADE, C. J. Cassava wastewater valorization for the production of biosurfactants: surfactin, rhamnolipids, and mannosileritritol lipids. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, 65, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03510-2>.

SILVA, C. P.; PEDROSO, C. R.; ZARPELLON, D. I.; MACHADO FILHO, J. G.; VIDAL, C. M. S.; ZIMMERMANN, C. M.; CAMPOS, S. X. Post-treatment of anaerobic reactor effluent for reuse using a triple filtration system. **Journal of Environmental Management**, v. 233, p. 76-82, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.030>.

STEINIGER, B.; HUPFAUF, S.; INSAM, H.; SCHAUM, C. Exploring anaerobic digestion from mesophilic to thermophilic temperatures – operational and microbial aspect. **Fermentation**, v. 9, n. 9, 798, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation9090798>.

TOMCZAK, W.; DANILUK, M.; KUJAWSKA, A. Food waste as feedstock for anaerobic mono-digestion process. **Applied Sciences**, v. 14, n. 22, 10593, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210593>.

UGWU, E. I.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; NWOBIA, L. I.; KUMAR, V.; IKECHUKWU, E. L.; VICTOR, E. C. Optimization of parameters in biomethanization process with co-digested poultry wastes and palm oil mill effluents. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 3, 100033, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100033>.

ZHANG, Q.; HE, J.; TIAN, M.; MAO, Z.; TANG, L.; ZHANG, J.; ZHANG, H. Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 19, p. 8899-8906, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.061>.