

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS: AVALIAÇÃO E MODELAGEM DE DESEMPENHO

Larissa Augusta da Cruz ¹
Andrieli Sena Lacerda ¹
Izabel Melz Fleck ¹
* Leandro Fleck ¹

ANAEROBIC CODIGESTION OF AGROINDUSTRIAL EFFLUENTS: PERFORMANCE EVALUATION AND MODELING

Recibido el 28 de noviembre de 2024. Aceptado el 9 de julio de 2025

Abstract

Studies that have carried out the anaerobic co-digestion of starch factory effluent with effluent from the animal blood processing agroindustry are unprecedented in the literature. The present study is based on the hypothesis that anaerobic co-digestion can be used for the efficient simultaneous treatment of wastewater from the production of cassava starch and effluent from the processing of cattle and pig blood. Sludge from an anaerobic biodigester applied to the treatment of wastewater from the production of cassava starch was used as an inoculum for the anaerobic co-digestion process. The factors temperature and operating time were controlled, and their effects on the parameters color, turbidity and chemical oxygen demand (COD) were evaluated using a Central Composite Rotational Design (CCRD), consisting of 11 experimental tests. For each response variable, a quadratic mathematical model was generated, validated by Analysis of Variance. The maximum turbidity, color and COD removal efficiency observed in the treatment system was 100%, 90.54% and 68.85%, respectively. A significant effect was observed for the interaction between operating time and operating temperature, when evaluating the COD removal efficiency. The mathematical models were not statistically significant, as for all dependent variables the p-value was higher than the adopted significance level, of 10%. The hypothesis about the possibility of carrying out anaerobic co-digestion of starch factory effluent and animal blood processing effluent was confirmed by the study and is an innovative possibility for the consortium for the treatment of organic waste generated by agro-industrial companies.

Keywords: agroindustry, starch farming, environmental impacts, animal blood.

¹Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS/Mundo Novo), Brasil.

* *Autor correspondente:* Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Mundo Novo, Br. 163, n. 235, Bairro Universitário, Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil, CEP 79980-000. Email: leandro.fleck@uems.br

Resumo

É inédito na literatura estudos que tenham realizado a codigestão anaeróbia de efluente de fecularia com efluente da agroindústria processadora de sangue animal. O presente estudo está baseado na hipótese de que a codigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento simultâneo da água residuária proveniente da produção de fécula de mandioca e do efluente do processamento de sangue de bovinos e suínos. Foi utilizado como inóculo para o processo de codigestão anaeróbia o lodo de um biodigestor anaeróbio aplicado ao tratamento da água residuária da produção de fécula de mandioca. Foram controlados os fatores temperatura e tempo de operação, sendo seus efeitos sobre os parâmetros cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), avaliados utilizando um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), composto por 11 ensaios experimentais. Para cada variável resposta, foi gerado um modelo matemático quadrático, validado por Análise de Variância. A eficiência máxima de remoção de turbidez, cor e DQO observadas no sistema de tratamento foi de 100%, 90.54% e 68.85%, respectivamente. Observou-se efeito significativo para a interação entre o tempo de operação e temperatura de operação, quando se avaliou a eficiência de remoção de DQO. Os modelos matemáticos não foram estatisticamente significativos, pois para todas as variáveis dependentes o p-valor foi superior ao nível de significância adotado, de 10%. A hipótese sobre a possibilidade de realizar a codigestão anaeróbia de efluente de fecularia e efluente de processamento de sangue animal foi confirmada pelo estudo, sendo está uma possibilidade inovadora para o consórcio de tratamento de resíduos orgânicos gerados por agroindustriais.

Palavras-chave: agroindústria, fecularia, impactos ambientais, sangue animal.

Introdução

A produção agroindustrial é uma das principais responsáveis pela geração de riquezas no Brasil (Bhardwaj *et al.*, 2023). Entretanto, uma das características comuns a maioria das agroindústrias e atividades agropecuárias é a geração de resíduos (Santos *et al.*, 2023), os quais podem apresentar um elevado potencial de poluição ao ecossistema quando não adequadamente gerenciados (Martins Filho *et al.*, 2018).

Dentre as inúmeras agroindústrias em operação nacionalmente, dois segmentos merecem destaque devido a utilização de água no processo produtivo e conseqüente geração de efluente líquido com potenciais características causadoras de impactos ambientais (Zhang *et al.*, 2011), sendo a fecularia (Lerdlattaporn *et al.*, 2021) e a indústria processadora de sangue animal (Nazifa *et al.*, 2021).

Na industrialização da mandioca para obtenção da fécula ocorre a separação de açúcares e fibras solúveis, gerando grande quantidade de resíduos (Souto *et al.*, 2016), os quais quando não adequadamente tratados podem resultar em impactos ambientais. O efluente líquido do processamento da mandioca se caracteriza pela elevada carga orgânica, efeito tóxico devido ao glicosídeo cianogênico linamarina, além da presença de nutrientes (Chidubem-Nwachinemere *et al.*, 2023).

Outro setor que vem crescendo, como conseqüência da notória atividade pecuarista brasileira (Bieluczyk *et al.*, 2024), é a agroindústria processadora de sangue animal (Siti *et al.*, 2021), a qual

gera efluentes que apresentam concentrações de matéria orgânica e nutrientes que demandam tratamentos específicos, para que impactos ambientais sejam evitados (Mishra *et al.*, 2023).

Dentre essas técnicas de tratamento de baixo custo existentes, cita-se a biodigestão anaeróbia, a qual consiste em um processo microbiológico (Neri *et al.*, 2023), em que grupos específicos de microrganismos, na ausência de oxigênio, trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, dióxido de carbono, água, sulfeto de hidrogênio, amônia e novas células bacterianas (Rahimieh; Nosrati, 2024).

Para aumentar a eficiência do tratamento biológico, a tendência atual em sistemas de tratamentos de resíduos orgânicos é a realização do processo de codigestão anaeróbia (Karki *et al.*, 2021), em que mais de um efluente orgânico é tratado simultaneamente no biodigestor anaeróbio, como forma de potencializar o equilíbrio nutricional essencial aos microrganismos responsáveis pelo processo de tratamento (Leite *et al.*, 2017). Diante deste cenário, é inédito na literatura estudos que tenham realizado a codigestão anaeróbia de efluente de fecularia com efluente da agroindústria processadora de sangue animal.

Neste contexto, o presente estudo partiu da hipótese de que a codigestão anaeróbia poderia ser empregada como alternativa viável para o tratamento simultâneo da água residuária da produção de fécula de mandioca e do efluente gerado no processamento de sangue de animal. A investigação teve como foco avaliar a viabilidade técnica dessa combinação de resíduos e explorar, de forma preliminar, o comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais, objetivando a identificação de tendências e a geração de informações úteis para futuras simulações em contextos reais de operação de biodigestores anaeróbios.

Material e métodos

Local de Estudo

O trabalho foi realizado no município de Mundo Novo, situado no extremo sul do estado de Mato Grosso do Sul, fazendo divisa com o Paraguai e com o estado do Paraná. O município possui área de 478.380 km², com a estimativa de 19.193 habitantes e densidade demográfica em 40.12 habitantes/km² (IBGE, 2022). O município está localizado nas coordenadas 23°56'17" S e 54°16'15" O, com altitude de 324 metros. A cidade dispõe de um clima temperado, com temperatura média de 28 °C no verão e de 11 °C no inverno.

Coleta e armazenamento do substrato

Foi utilizado como substrato para a condução dos ensaios de codigestão anaeróbia, o efluente proveniente de duas agroindústrias de grande porte localizadas no município de Mundo Novo/MS, sendo: fecularia (produção de fécula de mandioca) e indústria processadora de sangue

bovino e suíno (produção de proteína em pó). A escolha pelos efluentes se deu preponderantemente pelas características complementares em relação a demanda nutricional microbiológica, sendo o efluente da fecularia rico em carbono e com baixo pH e o efluente da agroindústria processadora de sangue animal rico em nitrogênio e com elevado pH.

Após coletado, o substrato foi armazenado em condições de congelamento (-5 °C) para que as características físico-químicas não fossem alteradas até o momento de uso para realização dos ensaios experimentais.

Caracterização dos substratos

A fim de padronizar as características físico-químicas, evitando sua influência na interpretação dos resultados, ambos os efluentes foram coletados em único dia, em volume suficiente para atender a demanda de todos os ensaios experimentais. A caracterização dos efluentes é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos efluentes utilizados no estudo de codigestão anaeróbia.

Parâmetro	Agroindústria		Metodologia
	Fecularia	Sangue Animal	
pH	4.25	8.12	APHA (2012)
Sólidos Totais (mg L ⁻¹)	10276.00	11615.00	APHA (2012)
Sólidos Voláteis (mg L ⁻¹)	9226.00	5979.00	APHA (2012)
Demanda Química de Oxigênio (mg L ⁻¹)	13856.00	12784.00	APHA (2012)
Nitrogênio Total (mg L ⁻¹)	53.20	566.30	APHA (2012)
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg L ⁻¹)	50.40	560.00	APHA (2012)
Nitrogênio Amoniacal (mg L ⁻¹)	32.00	780.00	APHA (2012)
Nitrito (mg L ⁻¹)	2.80	6.30	APHA (2012)
Nitrato (mg L ⁻¹)	<0.100	<0.100	APHA (2012)

Inóculo

Foi utilizado como inóculo para o processo de codigestão anaeróbia o lodo de um biodigestor anaeróbio aplicado ao tratamento da água residuária da produção de fécula de mandioca, localizado na mesma unidade industrial em que foi coletada a água residuária para os ensaios experimentais. Para cada temperatura do delineamento de tratamentos foi realizada a aclimatação da biomassa às novas condições de operação, em mistura com o efluente de processamento de sangue animal e fecularia, cujas proporções foram definidas em ensaios preliminares.

Monitoramento do processo

Para monitorar os níveis de acidez e/ou alcalinidade intrínsecos ao sistema, foi utilizado pHmetro de bancada (pH Pro - Line Lab). Para a correção do pH, foram utilizadas soluções de hidróxido de sódio (NaOH) 6 mol e solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 20% para obter valores desejáveis na faixa de 7.0, sendo este o pH ideal para o crescimento dos microrganismos anaeróbicos (Chen et al., 2015). Para garantir a continuidade da atividade microbiológica, os biodigestores foram monitorados diariamente, para cada ensaio experimental.

Módulo experimental e coleta de amostras

Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado um módulo experimental constituído por garrafas de polietileno tereftalato (PET) com volume útil de 1 L, as quais foram inseridas em Banho-Maria digital (SP Labor), com o controle de temperatura em níveis exigidos pelo delineamento experimental. Os reatores anaeróbios foram operados em sistema de batelada, apresentando uma saída/entrada para coleta de amostras e ajuste de pH.

Amostras da mistura dos efluentes líquidos foram coletadas no início e final de cada ensaio experimental para avaliar a eficiência de remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), utilizando respectivamente os seguintes métodos e instrumentos analíticos: calorímetro de bancada (Max Portátil), turbidímetro digital portátil-FX e Método 5520D (APHA, 2012).

Delineamento de tratamentos

Foram controlados os fatores temperatura ($^{\circ}C$) e tempo de operação (dias), sendo seus efeitos sobre os parâmetros cor, turbidez e demanda química de oxigênio, avaliados utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), ou seja, um esquema fatorial de tratamentos 2^2 , incluindo 4 ensaios fatoriais, 4 ensaios axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios. Optou-se pela utilização do DCCR no presente estudo, pelo fato deste ser caracterizado como uma estratégia eficaz de planejamento experimental que permite maximizar o aproveitamento dos dados obtidos, ao mesmo tempo em que minimiza a quantidade de experimentos exigidos para explorar um determinado espaço amostral (Souza et al., 2018). Na Tabela 2, observa-se a matriz do delineamento de tratamentos com os valores codificados e reais dos fatores em estudo, sendo os valores reais definidos com base em análises preliminares e referências da literatura.

Para garantir condições similares entre todos os ensaios experimentais, os efluentes foram previamente agitados para total homogeneização, seguido de mistura obedecendo a seguinte ordem: 45% de efluente de fecularia, 45% de efluente do processamento de sangue bovino e suíno e 10% de inóculo.

Tabela 2. Delineamento de tratamentos

Ensaio	Temperatura (valor codificado)	Temperatura (°C)	Tempo de Operação (valor codificado)	Tempo de Operação (dias)
1	-1	26.33	-1	14.89
2	-1	26.33	+1	24.11
3	+1	37.67	-1	14.89
4	+1	37.67	+1	24.11
5	-1.41	24.00	0	19.50
6	+1.41	40.00	0	19.50
7	0	32.00	-1.41	13.00
8	0	32.00	+1.41	26.00
9	0	32.00	0	19.50
10	0	32.00	0	19.50
11	0	32.00	0	19.50

Geração de modelos matemáticos

Para cada variável resposta (cor, turbidez e demanda química de oxigênio) foi gerado um modelo matemático quadrático representativo do processo, obtido a partir do ajuste estatístico dos resultados correspondentes a todos os ensaios do delineamento de tratamentos. O modelo matemático codificado ajustado a partir dos dados experimentais, é apresentado na Equação 1.

$$\text{Variável resposta: } a_1 + a_2\text{TRH} + a_3\text{TRH}^2 + a_4\text{TP} + a_5\text{TP}^2 + a_6\text{TRH} \times \text{TP} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

a = coeficientes que serão ajustados a partir dos dados experimentais.

TRH= valor codificado do tempo de operação.

TP = valor codificado da temperatura.

A escolha do modelo quadrático se justifica pelo fato de que o mesmo permite captar não apenas os efeitos lineares das variáveis independentes, mas também os efeitos quadráticos e as interações entre elas, o que é essencial para representar adequadamente a complexidade do processo de codigestão anaeróbia. Esse tipo de sistema frequentemente apresenta comportamento não linear em função das características intrínsecas do substrato. Assim, o uso de um modelo quadrático oferece maior flexibilidade e robustez na modelagem da superfície de resposta, possibilitando a identificação de condições ótimas de operação do sistema (Bhattacharya, 2021). A significância estatística dos modelos matemáticos originados no sistema foi testada pela Análise de Variância (ANOVA), com um intervalo de confiança de 90%.

Resultados e discussão

Análise de eficiência de remoção dos poluentes ambientais

O processo de codigestão anaeróbia da água residuária proveniente da produção de fécula de mandioca e do efluente originário do processamento de sangue de bovinos e suínos, proporcionou 100% de remoção de turbidez nos ensaios experimentais 4 e 7; já em relação a remoção de cor, a maior eficiência foi observada no ensaio experimental 2, sendo essa de 90.54%. Para a remoção de DQO houve predominância de eficiência de remoção próximo a 60%, sendo a maior remoção observada no ensaio experimental 9, de 68.85% (Tabela 3).

Tabela 3. Eficiência de remoção de parâmetros ambientais pela eletrofloculação

Ensaio Experimental	Remoção de Turbidez (%)	Remoção de Cor (%)	Remoção de DQO (%)
1	68.91	83.45	59.66
2	86.08	90.54	30.95
3	99.38	89.19	37.14
4	100.00	86.49	62.47
5	93.43	86.49	68.66
6	92.78	75.00	59.66
7	100.00	86.49	59.22
8	89.58	79.39	67.41
9	93.05	78.38	68.85
10	88.86	78.04	67.41
11	97.54	77.70	66.93

Destaca-se que as eficiências de remoção de turbidez, cor e DQO foram semelhantes nos ensaios experimentais conduzidos nas condições de ponto central do delineamento de tratamentos, apresentando baixa variabilidade. De acordo com Rodrigues e Lemma (2014), os ensaios do ponto central fornecem informações sobre o comportamento das respostas entre os níveis atribuídos aos fatores, evidenciando a qualidade da repetibilidade do processo e a confiabilidade dos dados experimentais, o que foi comprovado no presente estudo.

A literatura não apresenta trabalhos relevantes que realizaram a codigestão anaeróbia de efluente de fecularia com efluente de agroindústria processadora de sangue animal (bovino e suíno). Para fins de comparação, é possível citar trabalhos que realizaram a codigestão anaeróbia de efluente de fecularia com distintas fontes de material orgânico. Como exemplo, cita-se o trabalho de Larsen *et al.* (2014), os quais avaliaram a adição de glicerina bruta na digestão anaeróbia de efluente de indústria de fécula de mandioca, em reator de fluxo semicontínuo horizontal de uma fase, e constataram remoção de DQO que variou entre 91.54% e 98.69%, dentre todos os tratamentos estatísticos realizados. No presente estudo, a eficiência de remoção

de DQO foi inferior ao obtido por Larsen *et al.* (2014), o que pode ser justificado pelas diferentes condições experimentais empregadas e pela adição de efluente de agroindústria processadora de sangue animal ao processo de codigestão anaeróbia.

Análise de efeitos para a remoção de poluentes ambientais

O efeito de um fator pode ser entendido como a variação causada na resposta, quando percorremos todos os níveis desse fator, independentemente dos demais fatores (Rodrigues; lemma, 2014). Neste contexto, observou-se efeito significativo apenas para a interação entre o tempo de operação (TRH) e a temperatura de operação (TP), quando se avaliou a eficiência de remoção de DQO. Para este caso o efeito foi positivo, ou seja, a variação de todos os níveis de um dos fatores dentro de cada nível do outro fator aumentou a remoção de DQO no biodigestor anaeróbio (Tabela 4).

Tabela 4. Análise de efeitos para o processo de eletrofloculação

Fator	Turbidez		
	Efeito	Erro Padrão	p-valor
Média	93.17	5.67	1.5x10 ⁻⁴
TR. ** (L)	10.90	6.96	0.178
TR. (Q)	-2.76	8.30	0.753
TM. *** (L)	0.78	6.96	0.915
TM. (Q)	-1.07	8.30	0.903
TR. X TM.	-8.28	9.83	0.438
Cor			
Média	78.02	2.92	1.0x10 ⁻⁴
TR. (L)	-3.64	3.58	0.356
TR. (Q)	5.54	4.27	0.251
TM.(L)	-1.41	3.58	0.710
TM. (Q)	7.74	4.27	0.130
TR. X TM.	-4.90	5.06	0.378
Demanda Química de Oxigênio			
Média	67.79	6.37	1.26x10 ⁻⁴
TR. (L)	-0.93	7.81	0.910
TR. (Q)	-11.78	9.32	0.262
TM.(L)	2.05	7.81	0.804
TM. (Q)	-12.63	9.32	0.233
TR. X TM.	27.02	11.03	0.058*

*Estatisticamente significativo com um nível de significância de 10%; **TR. corresponde a temperatura de operação; ***TM. corresponde ao tempo de operação; L- corresponde aos termos lineares; Q- corresponde aos termos quadráticos.

Modelagem matemática para remoção de poluentes ambientais

Os modelos matemáticos representativos do processo de codigestão anaeróbia para a remoção de turbidez, cor e DQO estão apresentados nas equações 2, 3 e 4, respectivamente. Os coeficientes foram estimados com base na análise de regressão linear múltipla, utilizando o método dos mínimos quadrados, com o apoio do Software Statistica. A regressão linear múltipla foi aplicada para o ajuste dos modelos quadráticos às variáveis resposta, com base nos dados obtidos em todos os ensaios do Delineamento Composto Central Rotacional. O método dos mínimos quadrados foi utilizado para estimar os coeficientes dos modelos, minimizando a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores observados e os valores preditos pelas equações.

Fleck *et al.* (2013), evidenciaram em seu trabalho a importância da modelagem matemática associada a simulação de cenários no âmbito ambiental, sendo está uma das principais motivações para a modelagem matemática do processo de codigestão anaeróbia dos efluentes de fecularia e agroindústria processadora de sangue bovino e suíno.

$$T (\%) = 93.171 + 5.450TRH - 1.381TRH^2 + 0.388TP - 0.534TP^2 - 4.138TRH.TP \quad \text{Equação (2)}$$

$$C (\%) = 78.018 - 1.820TRH + 2.770TRH^2 - 0.705TP + 3.870TP^2 - 2.448TRH.TP \quad \text{Equação (3)}$$

$$DQO (\%) = 67.794 - 0.463TRH - 5.892TRH^2 + 1.024TP - 6.317TP^2 + 13.510TRH.TP \quad \text{Equação (4)}$$

Em que:

T (%)= eficiência de remoção de turbidez.

C (%)= eficiência de remoção de cor.

DQO (%)= eficiência de remoção de demanda química de oxigênio.

TRH= valor codificado do tempo de operação.

TP = valor codificado da temperatura

Ao analisar a Equação 2, observa-se que a remoção de turbidez foi favorecida pelo aumento do tempo de operação (TRH), porém esse efeito diminuiu em níveis mais elevados devido ao termo quadrático negativo. A temperatura (TP) também contribuiu positivamente, mas com efeito limitado, sendo prejudicada em extremos. A interação negativa entre tempo e temperatura indica que combinações elevadas desses fatores reduzem a eficiência da remoção de turbidez. Pela Equação 3, fica evidente que a remoção de cor apresentou comportamento quadrático em relação ao tempo de operação e à temperatura, com efeitos lineares negativos e quadráticos positivos, indicando maior eficiência em níveis intermediários desses fatores. A interação entre TRH e TP foi negativa, sugerindo que combinações extremas de tempo e temperatura prejudicam a remoção de cor. Já pela Equação 4, é possível inferir que eficiência de remoção da DQO foi negativamente influenciada pelo tempo de operação, tanto linear quanto quadraticamente, indicando pior desempenho em tempos mais longos. A temperatura teve efeito positivo linear, mas foi limitada por um efeito quadrático negativo. A interação entre tempo e temperatura teve

forte influência positiva, mostrando que a combinação adequada desses fatores melhora significativamente a remoção da DQO.

Na Tabela 5 é apresentada à análise de variância (ANOVA) para a validação estatística dos modelos matemáticos propostos. É possível observar que os modelos matemáticos não foram estatisticamente significativos, pois para todas as variáveis dependentes o p-valor foi superior ao nível de significância adotado, de 10%.

Tabela 5. Validação estatística dos modelos matemáticos de simulação

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Gráus de Liberdade	Turbidez Quadrado Médio	p-valor	R ²
Regressão	318.92	5	63.78	0.670	39.66
Resíduos	482.88	5	96.58		
Total	801.80				
Cor					
Regressão	181.23	5	36.25	0.356	54.75
Resíduos	127.90	5	25.58		
Total	309.13				
DQO					
Regressão	1158.10	5	231.62	0.248	63.63
Resíduos	608.14	5	121.63		
Total	1766.24				

Apesar de o valor de R² não atingir valores próximos a 100%, os modelos matemáticos ajustaram razoavelmente os dados experimentais, com o modelo de remoção de DQO apresentando o melhor ajuste (R² = 63.63%). Esses resultados indicam que, embora o modelo para turbidez e cor tenha apresentado ajustes mais modestos (R² de 39.66% e 54.75%, respectivamente), ainda assim são representações úteis para o comportamento do processo. A variação nos valores de R² reflete a complexidade do sistema e a variabilidade dos dados experimentais, e oferece uma base sólida para ajustes futuros, especialmente com a coleta de mais dados ou a inclusão de termos polinomiais de grau superior. Esses resultados indicam que o modelo é capaz de capturar uma parte significativa das relações entre os fatores, proporcionando percepções para a otimização do processo de codigestão anaeróbica. Ainda sobre o coeficiente de determinação, ou R², Rodrigues e Lemma (2014) afirmam que este se caracteriza como uma representação da qualidade do ajuste da reta de regressão aos dados experimentais, o qual fornece uma medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação a variação total das respostas.

Embora os modelos matemáticos não sejam estatisticamente significativos, é encorajada a utilização dos mesmos para a investigação preliminar de possíveis cenários, quando a biodigestão anaeróbia é aplicada ao tratamento simultâneo da água residuária da produção de fécula de mandioca e efluente de agroindústria processadora de sangue animal e suíno. Para embasar este argumento, cita-se que a eficiência do sistema foi elevada para a remoção de cor, turbidez e DQO (Tabela 3), ou seja, mesmo os modelos matemáticos não descrevendo significativamente as variações observadas nas variáveis dependentes, entende-se que o sistema proposto possa ser utilizado em escala real e que estudos adicionais podem ser realizados para determinar as variáveis independentes que são importantes ao tratamento biológico, influenciam nos resultados, mas que não foram consideradas no presente estudo.

Gráficos de superfície de resposta

Embora os p-valores para os modelos de turbidez, cor e DQO tenham excedido o limiar de 0.1, a opção por gerar as superfícies de resposta se justifica pela necessidade de explorar visualmente o comportamento do processo, mesmo quando a significância estatística não é alcançada. Em estudos experimentais desse tipo, é comum utilizar as superfícies de resposta como uma ferramenta para identificar padrões e relações entre os fatores, além de guiar ajustes operacionais futuros. Mesmo sem significância estatística robusta, essas superfícies podem revelar tendências importantes e possibilitar a otimização das condições de operação. Assim, a decisão de gerar as superfícies visou obter uma compreensão mais aprofundada das possíveis influências dos fatores e suas interações, que podem orientar novas investigações ou ajustes nos parâmetros do processo.

Com base nessas informações, a Figura 1 apresenta os gráficos de superfície de resposta gerados no software Statistica, correspondentes ao modelo matemático proposto para a turbidez (A), cor (B) e DQO (C). Os modelos foram construídos com base nos dados experimentais obtidos nos ensaios experimentais e ajustados por regressão. Os pontos experimentais utilizados na calibração dos modelos estão indicados na figura por círculos azuis, permitindo a visualização da correspondência entre os dados observados e as superfícies geradas.

Embora os gráficos de superfície apresentados na Figura 1 permitam uma visualização qualitativa da tendência dos efeitos das variáveis independentes sobre as respostas analisadas, é importante destacar que os modelos matemáticos ajustados (Equações 2, 3 e 4) apresentaram limitações estatísticas, como valores de p superiores ao limite de significância e coeficientes de determinação (R^2) relativamente baixos. Esses resultados indicam que os modelos não descrevem integralmente a variabilidade dos dados experimentais, o que impõe restrições à extrapolação e interpretação quantitativa dos efeitos. Assim, as superfícies devem ser compreendidas como representações indicativas e não como descrições rigorosas do comportamento do sistema.

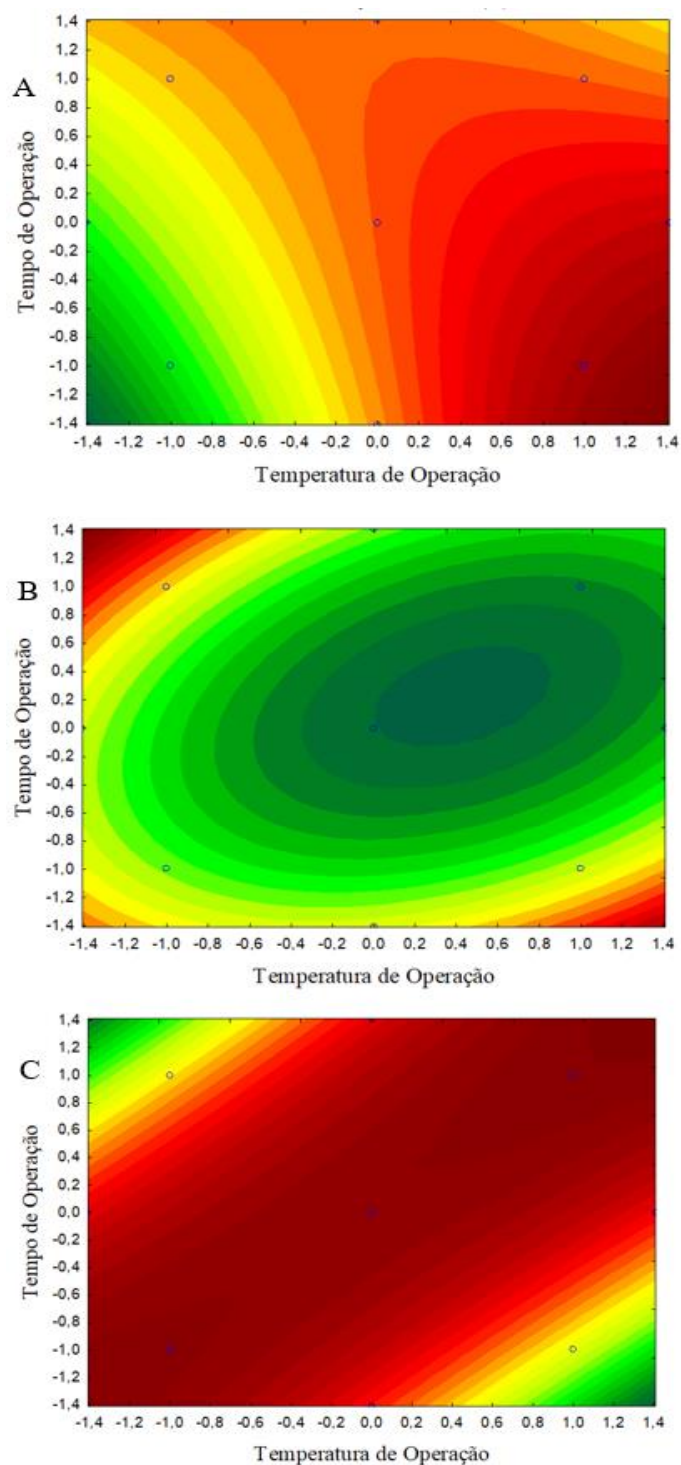


Figura 1. Superfícies de resposta representando as tendências de variação da turbidez (A), cor (B) e DQO (C) em função da temperatura e do tempo de operação.

A maior remoção de turbidez (Figura 1A) ocorre em condições mais elevadas de temperatura, e em tempos de operação reduzidos, conforme os limites definidos pelo delineamento de tratamentos (Tabela 2). A maior remoção de cor (Figura 1B) ocorre quando o biodigestor anaeróbio opera com baixas temperaturas, mas em elevado tempo de operação; resultado semelhante é observado quando o biodigestor opera em altas temperaturas, mas em baixo tempo de operação. Considerando estas informações, sugere-se que para a remoção do parâmetro cor deve-se levar em consideração dois questionamentos básicos: a) qual o volume de geração de efluentes por dia? e, b) é viável economicamente promover o aumento da temperatura no biodigestor anaeróbio? Caso o biodigestor anaeróbio suporte a carga de efluente gerado pelas agroindústrias, sugere-se aumentar o tempo de operação (TRH), sem promover o aquecimento do sistema de tratamento, pois além de encarecer o processo, pode resultar em gastos energéticos que não serão interessantes do ponto de vista ambiental.

Para o parâmetro DQO, observa-se que uma ampla faixa de operação do sistema de tratamento anaeróbio, considerando os limites impostos pelo delineamento de tratamentos (Tabela 2), proporciona resultados satisfatórios de eficiência de remoção. Estes resultados corroboram com as discussões apresentadas na Tabela 5, em que o coeficiente de determinação para o parâmetro DQO foi o que apresentou os melhores resultados. Neste contexto, considerando a Figura 1 C, sugere-se que para a remoção de DQO, o processo de codigestão anaeróbia do efluente de fecularia e efluente de unidade industrial processadora de sangue animal, opere nas menores condições impostas pelo delineamento de tratamentos, o que resulta em benefícios econômicos e ambientais, sem comprometer a eficiência do sistema.

Todas as discussões apresentadas sugerem que estudos adicionais podem ser realizados em diferentes condições de temperatura e tempo de operação, a fim de que seja investigada a possibilidade de otimização simultânea das variáveis respostas pela aplicação da técnica da função de desejabilidade, proposta por Derringer e Suich (1980), como forma de reduzir o tempo de operação do reator anaeróbio, sem comprometer a eficiência do sistema empregado para o tratamento biológico das águas residuárias alvo do presente estudo.

Considerações finais

A hipótese sobre a possibilidade de realizar a codigestão anaeróbia do efluente de fecularia com o efluente do processamento de sangue animal foi confirmada pelo presente estudo, configurando-se como uma ação inovadora para o consórcio de tratamento desses resíduos orgânicos gerados por agroindústrias. Ressalta-se que a codigestão de resíduos agroindustriais representa uma abordagem promissora para a melhoria da digestão anaeróbia, especialmente pela combinação de substratos com características complementares. Diversos estudos apontam que essa prática pode gerar efeitos sinérgicos, como o aumento da estabilidade do processo e

eficiência na degradação da matéria orgânica. Embora os resultados aqui obtidos não tenham evidenciado vantagens expressivas do ponto de vista estatístico, observa-se que a mistura dos efluentes estudados apresenta potencial para otimizar o equilíbrio nutricional do meio reacional e favorecer a atividade microbológica. Diante disso, reforça-se a necessidade de estudos complementares, com delineamentos experimentais mais amplos e controle adequado, que incluam comparações diretas com a digestão individual dos resíduos, permitindo avaliar de forma mais robusta os efeitos específicos do processo de codigestão anaeróbia.

Paralelamente, buscou-se ajustar modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento das variáveis-resposta (turbidez, cor e DQO) em função das condições operacionais, por meio de superfícies de resposta. Embora os modelos tenham permitido uma visualização qualitativa das tendências do sistema, apresentaram limitações estatísticas (como baixo R^2 ou p-valores não significativos), o que restringe sua capacidade preditiva. Tais limitações são atribuídas, em parte, à variabilidade dos dados experimentais e à simplicidade da estrutura matemática adotada. Assim, para aprimorar a análise futura, sugere-se a reestruturação do modelo com base em métodos estatísticos mais robustos, bem como a reavaliação dos parâmetros considerados no estudo. Essas melhorias podem aumentar a confiabilidade da modelagem e fornecer subsídios mais consistentes para a avaliação do desempenho da codigestão anaeróbia como alternativa para o tratamento de resíduos agroindustriais.

Ainda assim, considera-se que a abordagem pode ser útil em etapas exploratórias de projetos de tratamento. A proposta de codigestão anaeróbia aqui apresentada reflete uma situação comum em regiões com forte presença de agroindústrias, onde diferentes efluentes orgânicos são gerados em proximidade. Nessa perspectiva, o consórcio de tratamento por codigestão pode representar uma estratégia prática e economicamente viável para o manejo conjunto desses resíduos, com potencial de otimização de recursos e redução de impactos ambientais. Neste contexto, os autores sugerem que gestores ambientais de empresas similares considerem a codigestão anaeróbia como alternativa viável para o tratamento de efluentes líquidos, especialmente pela possibilidade de redução de custos operacionais e conformidade com a legislação ambiental vigente. Como vantagem adicional, é encorajada a avaliação da viabilidade de aproveitamento energético do biogás potencialmente gerado, embora a produção e a caracterização deste biocombustível não tenham sido escopo do presente estudo, sendo necessária a realização de investigações complementares.

Agradecimentos

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) pela disponibilização de bolsa de Iniciação Científica.

Referências bibliográficas

- APHA, American Water Works Association (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th ed. Washinton, DC – EUA: Ed. American Public Health Association, Water Environment Federation. 2012.
- Bieluczyk, W., Cherubin, M. R., Cerri, C. E. P., Siqueira-Neto, M., Abdalla-Filho, A. L., Castro, J. I. A., Locatelli, J. L., Tsai, S. M., Camargo, P. B. (2024) Greenhouse gas fluxes in brazilian climate-smart agricultural and livestock systems: A systematic and critical overview. *Journal of Cleaner Production*, **464**(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142782>
- Bhardwaj, A., Kumar, S., Singh, D. (2023) Tannery effluent treatment and its environmental impact: a review of current practices and emerging technologies. *Water Quality Research Journal*, **58**(2), 128-152. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2023.002>
- Bhattacharya, S. (2021) Central Composite Design for response surface methodology and its application in pharmacy. *Chapter*, (1), 1-19. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95835>
- Chen, S., Zhang, J., Wang, X. (2015) Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. *Waste Management & Research*, **33**(11), 1033-1040. <https://doi.org/10.1177/0734242x15602965>
- Chidubem-Nwachinemere, N. O., Orji, M. U., Achugbu, A. N., Achugbu, O. E., Okali, U. O., Osilo, N. A. O. (2023) Physicochemical Composition of Cassava Mill Effluents in Five Processing Plants in Anambra State, Nigeria. *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, **9**(5), 31-34. https://www.jmr.com/upload/physicochemical-composition-of-cassava-mill-effluents-in-five-processing-plants-in-anambra-state-nigeria_1685359205.pdf
- Derringer G. C., Suich, R. (1980) Simultaneous optimization of several responses variables. *Journal of Quality Technology*, **12**(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Fleck, L., Tavares, M. H. F., Eyng, E. (2013) Conceitos e importância da modelagem matemática de qualidade da água para gestão dos recursos hídricos. *Revista Ambiência*, **9**(3), 487-503. <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2013.03.03>
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., Hashimoto, A., Khanal, S. K. (2021) Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, **330**(1), 125001. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>
- Larsen, A. C., Gomes, B. M., Gomes, S. D., Zenatti, D. C., Torres, D. G. B. (2013) Anaerobic co-digestion of crude glycerin and starch industry effluent. *Engenharia Agrícola*, **33**(2), 341-352. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000200013>
- Leite, V. D., Barros, A. J. M., Menezes, J. M., Sousa, J. T., Lopes, W. S. (2017) Codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. *Revista DAE*, **65**(208), 35-46. <https://doi.org/10.4322/dae.2017.004>
- Lerdlattaporn, R., Phalakornkule, C., Trakulvichean, S., Songkasiri, W. (2021) Implementing circular economy concept by converting cassava pulp and wastewater to biogas for sustainable production in starch industry. *Sustainable Environment Research*, **31**(20), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00093-9>
- Martins Filho, J. B., Neves, R. A., Araújo, J. S., Ferrão, G. E., Pires, I. C. G. (2018) Resíduos orgânicos agropecuários e biodigestores: análise sobre a produção bibliográfica do período de 2000-2017. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, **9**(5), 281-293. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0025>
- Mishra, S., Kumar, R., Kumar, M. (2023) Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Environmental, health, and economic impacts. *Total Environment Research Themes*, **6**(1), 100051. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051>
- Nazifa, T. H., Saady, N. M. C., Bazan, C., Zendeheboudi, S., Aftab, A., Albayati, T. M. (2021) Anaerobic Digestion of Blood from Slaughtered Livestock: A Review. *Energies*, **14**(1), 1-25. <https://doi.org/10.3390/en14185666>
- Neri, A., Bernardi, B., Zimbalatti, G., Benalia, S. (2023) Na overview of anaerobic digestion of agricultural by-products and food waste foi biomethane production. *Energies*, **16**(6851), 1-20. <https://doi.org/10.3390/en16196851>

- Rahimiedh, A., Nosrati, M. (2024) A review on biochemistry, microbiology and thermodynamic aspects of propionate: The key intermediate in the anaerobic digestion and wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, **317**(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100191>
- Rodrigues, M. R., Iemma, A. F. (2014) *Experimental design and process optimization*. 2a. ed. São Paulo: 2014.
- Santos, D. de C. L. P., Correa, C. Alves, Y. A., Souza, C. G., Boloy, R. A. M. (2023) Brazil and the world market in the development of technologies for the production of second-generation ethanol. *Alexandria Engineering Journal*, **67**(1), 153-170. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.004>
- Siti, J. M. S., Nurrulhidayah, A. F., Azura, A., Mat, J. S. M., Abdul, R., Nur, A. T., Arieff, S. R., Rashidi, O. (2021) Issues related to animal blood into food products: a review paper. *Food Research*, **5**(3), 12-21. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(3\)512](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(3)512)
- Souto, L. R. F., Caliarí, M., Soares Júnior, M. S., Fiorida, F. A., Garcia, M. C. (2016) Utilization of residue from cassava starch processing for production of fermentable sugar by enzymatic hydrolysis. *Food Science and Technology*, **37**(1), 19-24. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.0023>
- Souza, L. D. P., Azerêdo, G. A., Silva, F. A. (2018) Comportamento do concreto sob altas temperaturas via planejamento experimental fatorial com configuração estrela. *Ambiente Construído*, **18**(1), 327-344. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100224>
- Zhang, Q., He, J., Tian, M., Mao, Z., Tang, L., Zhang, J., Zhang, H. (2011) Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium. *Bioresource Technology*, **102**(19), 8899-8906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.061>