LUCIANA DORNELLES VENQUIARUTO
(Organizadora)

EXPRESSÕES ACADÊMICAS 2026

ENGENHARIA QUÍMICA



EDIFAPES

EXPRESSÕES ACADÊMICAS 2026 /
ENGENHARIA QUÍMICA

LUCIANA DORNELLES VENQUIARUTO
(ORGANIZADORA)

EXPRESSÕES ACADÊMICAS 2026 /
ENGENHARIA QUÍMICA

ERECHIM-RS
2026

Todos os direitos reservados à EDIFAPES.
Proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma e por qualquer meio mecânico ou eletrônico, inclusive através de fotocópias e de gravações, sem a expressa permissão dos autores. Os dados e a completude das referências são de inteira e única responsabilidade dos autores.

Conselho Editorial:
Adilson Luíz Stankiewicz (URI / Erechim/RS) - Presidente
Arnaldo Nogaro (URI / Erechim/RS)
Cláudia Petry (UPF / Passo Fundo/RS)
Elcemina Lucia Balvedi Pagliosa (URI / Erechim/RS)
Elisabete Maria Zanin (URI /Erechim/RS)
Maria Elaine Trevisan (UFSM / Santa Maria/RS)
Jadir Camargo Lemos (UFSM / Santa Maria/RS)
Neila Tonin Agranionih (UFPR / Curitiba/PR)
Sérgio Bigolin (URI / Erechim/RS)
Yuri Tavares Rocha (USP / São Paulo/SP)

Revisão Linguística: Os autores.
Capa: Luciana Dornelles Venquiaruto, em colaboração com Inteligência Artificial (ChatGPT (OpenAI).

E96 Expressões acadêmicas 2026 [recurso eletrônico] : engenharia química / organização Luciana Dornelles Venquiaruto. – Erechim, RS: EdiFAPES, 2026.
Recurso eletrônico: il

Modo de acesso: http://www.uricer.edu.br/edifapes

ISBN 978-65-84142-17-6

1. Engenharia química 2. Produção científica – acadêmicos I. Título
II. Venquiaruto, Luciana Dornelles

C.D.U.: 66.0

Catalogação na fonte: bibliotecária Sandra Milbrath CRB 10/1278

EDIFAPES
Livraria e Editora
Erechim/RS

SUMÁRIO

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E DETERMINAÇÃO DE ANTOCIANINAS MONOMÉRICAS EM VINHOS ARTESANAIS PRODUZIDOS POR AGRICULTORES FAMILIARES DE ERECHIM, RIO GRANDE DO SUL 8

Bianca Scotton Tessmann, Anderson Berti Pagliari, Carolina Elisa Demaman Oro, Rogério Marcos Dal Lago, Luciana Dornelles Venquiaruto 8

MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DO IPÊ-ROXO (*Handroanthus heptaphyllus*): UMA REVISÃO 21

Guilherme Henrique Mazetto, Lucas Henrique do Nascimento, Jamile Zeni 21

MICROFILTRAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO DE FRIGORÍFICOS DE AVES E SUÍNOS: AVALIAÇÃO DO FLUXO PERMEADO E DA MORFOLOGIA DA MEMBRANA 40

Euller Eduardo Boff, Elisandra Rigo, Eduarda Alves Da Fonseca, Verônica Baldon Fusinato, Clarice Steffens, Juliana Steffens..... 40

ESTUDO DE EFICIÊNCIA DA ELETROCOAGULAÇÃO NA REMOÇÃO DE CROMO TRIVALENTE (Cr3+) DE EFLUENTES INDUSTRIAIS 52

Kelvin Vargas Franco, Rogério Marcos Dallago, Natalia Paroul..... 52

PRÉ-TRATAMENTOS E HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE JATOBÁ (*Hymenaea stigonocarpa*) E PEQUI (*Caryocar brasiliense*) VISANDO À OBTENÇÃO DE AÇÚCARES FERMENTESCÍVEIS 69

Hernan Felipe Pieta Biavatti, Laís Thomazoni, Jamile Zeni, Eunice Valduga 69

SÍNTESE E APLICAÇÃO DE HIDRÓXIDOS DUPLOS LAMELARES HIDROFÓBICOS E MAGNÉTICOS: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ADSORTIVAS E FOTOCATALÍTICAS PARA REMOÇÃO DE CORANTES DE SOLUÇÕES AQUOSAS 82

Giovani Balen Grass, Gabriela Mesquita Bruel, Rogério Marcos Dallago 82

APRESENTAÇÃO

O livro **EXPRESSÕES ACADÊMICAS** reúne estudos desenvolvidos no âmbito do Curso de Engenharia Química da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim, ao longo do ano de 2026. A obra apresenta pesquisas desenvolvidas por acadêmicos, docentes e pós-graduandos, evidenciando o caráter colaborativo da produção científica e o compromisso institucional com a integração entre ensino, pesquisa e extensão. Os trabalhos aqui apresentados representam o resultado de uma trajetória de formação pautada na investigação científica, na integração entre teoria e prática e na busca por soluções para desafios tecnológicos, ambientais e industriais. Mais do que um requisito para a conclusão da graduação, os Trabalhos de Conclusão de Curso constituem um espaço privilegiado para o desenvolvimento da capacidade investigativa e da autonomia intelectual, preparando profissionais capazes de transformar o conhecimento científico em soluções sustentáveis e socialmente relevantes.

Ao transformar os resultados dessas pesquisas em uma publicação científica, a Universidade reafirma seu compromisso com a produção e a disseminação do conhecimento, fortalecendo a pesquisa como elemento essencial da formação acadêmica. Mais do que registrar a conclusão de uma etapa da graduação, esta obra amplia o alcance das investigações desenvolvidas na Instituição e evidencia o papel da Universidade na geração de conhecimento, na promoção da inovação e na contribuição para o desenvolvimento científico, tecnológico e social.

Os cinco capítulos que compõem esta edição refletem a diversidade de áreas de atuação da Engenharia Química e demonstram a amplitude das contribuições que essa ciência oferece à sociedade. As pesquisas contemplam temas relacionados ao aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis, ao estudo de compostos bioativos presentes em espécies vegetais brasileiras, à caracterização físico-química de bebidas produzidas regionalmente, ao desenvolvimento de tecnologias para o tratamento e ao reúso de efluentes e à aplicação de processos eletroquímicos na remoção de contaminantes metálicos de águas residuárias.

Embora cada capítulo apresente objetivos, metodologias e resultados próprios, todos compartilham um propósito comum: produzir conhecimento científico relevante e contribuir para o desenvolvimento de soluções capazes de responder às demandas da sociedade contemporânea.

Espera-se que esta obra contribua para a disseminação do conhecimento produzido na graduação e reforce a importância da pesquisa científica para o

desenvolvimento da sociedade. A ciência amplia as fronteiras do conhecimento, impulsiona a inovação e promove avanços em diferentes áreas, contribuindo para o enfrentamento dos desafios contemporâneos. Que os estudos aqui apresentados inspirem novas investigações e reafirmem o papel da Universidade como espaço de produção do conhecimento e transformação social. Desejo a todos uma excelente leitura!

Profa. Dra. Luciana Dornelles Venquiaruto

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E DETERMINAÇÃO DE ANTOCIANINAS MONOMÉRICAS EM VINHOS ARTESANAIS PRODUZIDOS POR AGRICULTORES FAMILIARES DE ERECHIM, RIO GRANDE DO SUL

Bianca Scotton Tessmann[1], Anderson Berti Pagliari[2], Carolina Elisa Demaman Oro[3], Rogério Marcos Dal Lago[4], Luciana Dornelles Venquiaruto[5]

[1]Acadêmica do Curso de Engenharia Química (URI) – bianca.scottont@gmail.com
[2]Pós Doutorando em Engenharia de Alimentos (URI) – anderson.bpagliari@gmail.com
[3]Pós Doutoranda em Engenharia de Alimentos (URI) – carolinae.oro@hotmail.com
[4]Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química (URI) – dallago@uri.com.br
[5]Profª. Drª. do Curso de Engenharia Química (URI) – venquiaruto@uri.com.br

RESUMO: A produção artesanal de vinhos constitui importante alternativa para a diversificação da renda e a valorização da agricultura familiar e da vitivinicultura regional. Este estudo teve como objetivo caracterizar os parâmetros físico-químicos e determinar o teor de antocianinas monoméricas totais em vinhos tintos artesanais produzidos por agricultores familiares do município de Erechim, Rio Grande do Sul. Foram analisadas quatro amostras, sendo três da cultivar Bordô e uma da cultivar Isabel. Determinaram-se pH, acidez total, extrato seco, teor de cinzas, densidade, teor alcoólico e antocianinas monoméricas totais pelo método do pH diferencial. Os resultados foram comparados com a legislação brasileira vigente e com dados da literatura. Os vinhos apresentaram pH entre 2,94 e 3,21, teor alcoólico de 10,1 a 11,3% (v/v), densidade entre 0,997 e 0,999 g mL^{-1} e extrato seco entre 17,07 e 19,91 g L^{-1}, indicando, de modo geral, adequada qualidade tecnológica. Apenas uma amostra apresentou acidez total acima do limite legal. As concentrações de antocianinas variaram de 42,08 a 257,16 mg L^{-1}, sendo significativamente maiores nos vinhos elaborados com a cultivar Bordô em comparação à cultivar Isabel. Os resultados evidenciam a influência da cultivar sobre a composição fenólica e indicam, de modo

geral, boa qualidade tecnológica dos vinhos artesanais produzidos em Erechim, ressaltando a importância do monitoramento analítico para o fortalecimento da vitivinicultura regional.

Palavras-chave: Vinho artesanal. Agricultura familiar. Caracterização físico-química. Antocianinas.

Introdução

O vinho é uma das bebidas fermentadas mais antigas produzidas pela humanidade, sendo obtido exclusivamente pela fermentação alcoólica parcial ou total do mosto de uvas frescas, esmagadas ou não, conforme definição estabelecida pela Organização Internacional da Vinha e do Vinho (OIV). Além de sua importância econômica, o vinho possui elevado valor histórico, cultural e gastronômico, desempenhando papel relevante na identidade de diversas regiões produtoras ao redor do mundo. No Brasil, sua produção é regulamentada por normas específicas que estabelecem critérios de identidade e qualidade, assegurando padrões mínimos para comercialização e consumo (Brasil, 2018; Brasil, 2024).

Nos últimos anos, a produção artesanal de vinhos tem adquirido crescente importância no cenário nacional, especialmente entre agricultores familiares. Esse modelo produtivo caracteriza-se pelo emprego de técnicas tradicionais de vinificação, utilização de mão de obra familiar e produção em pequena escala, constituindo importante alternativa para diversificação da renda no meio rural e preservação de práticas culturais transmitidas entre gerações (Luquesi; Ferrarezi Junior, 2022). No norte do Rio Grande do Sul, particularmente no município de Erechim, a elaboração artesanal de vinhos representa uma atividade consolidada em diversas propriedades rurais, contribuindo para a valorização da agricultura familiar e da identidade regional.

A avaliação da qualidade tecnológica dos vinhos constitui etapa essencial para garantir a identidade, a estabilidade e a segurança dos produtos elaborados, além de fornecer subsídios para o aperfeiçoamento dos processos de vinificação. Segundo Jackson (2020), a caracterização físico-química representa uma das principais ferramentas para compreender a qualidade do vinho, permitindo relacionar sua composição química com aspectos tecnológicos, sensoriais e de conservação.

Nesse contexto, parâmetros como pH, acidez total, teor alcoólico, teor de cinzas, extrato seco e densidade são amplamente utilizados para monitorar a conformidade com a legislação e caracterizar o potencial tecnológico dos vinhos. Paralelamente, a determinação de compostos fenólicos, especialmente das antocianinas, fornece informações relevantes sobre a intensidade da coloração, a estabilidade cromática, a capacidade antioxidante e o potencial de agregação de valor dos produtos, constituindo importantes indicadores de qualidade em vinhos tintos (Jackson, 2020; He *et al.*, 2010; Neira-Ospina *et al.*, 2024).

Entretanto, apesar da relevância econômica e social dessa atividade, muitos vinhos artesanais ainda apresentam limitada caracterização físico-química. A ausência de monitoramento sistemático dificulta a avaliação da qualidade, da estabilidade do produto e da conformidade com os Padrões de Identidade e Qualidade (PIQ) estabelecidos pelo Ministério da Agricultura e Pecuária. Esse cenário pode restringir a inserção dos pequenos produtores em mercados mais exigentes e reduzir a competitividade dos produtos regionais.

Entre os parâmetros utilizados para avaliação da qualidade dos vinhos destacam-se o pH, a acidez total titulável, o teor alcoólico, o extrato seco, a densidade e o teor de cinzas, os quais exercem influência direta sobre a estabilidade microbiológica, o equilíbrio sensorial e a conservação do produto. Paralelamente, a quantificação de compostos fenólicos, especialmente das antocianinas monoméricas, fornece informações importantes sobre a intensidade da coloração, o potencial antioxidante e a qualidade tecnológica dos vinhos tintos (Kowal *et al.*, 2023; Neira-Ospina *et al.*, 2024).

As antocianinas constituem os principais pigmentos naturais responsáveis pela coloração vermelho-violeta dos vinhos tintos, e sua concentração é influenciada por fatores como a cultivar, as condições edafoclimáticas, o grau de maturação das uvas, as técnicas de maceração e as condições de armazenamento. Dessa forma, a determinação desses compostos, associada à caracterização físico-química, fornece informações relevantes para a avaliação da qualidade tecnológica, da estabilidade cromática e das características dos vinhos produzidos em diferentes regiões vitivinícolas (He *et al.*, 2010).

Embora existam diversos estudos sobre a caracterização físico-química de vinhos brasileiros (Rizzon; Miele, 2002; Kowal *et al.*, 2023; Wurz *et al.*, 2021), observa-se escassez de trabalhos voltados especificamente à caracterização de vinhos artesanais produzidos por agricultores familiares da região de Erechim, especialmente aqueles que relacionam parâmetros físico-químicos, composição fenólica e conformidade com a legislação vigente. Essa lacuna limita o conhecimento científico sobre a qualidade desses produtos e reduz a disponibilidade de informações que possam subsidiar ações de assistência técnica, melhoria dos processos produtivos e valorização da vitivinicultura regional.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar os parâmetros físico-químicos e determinar o teor de antocianinas monoméricas totais em vinhos tintos artesanais produzidos por agricultores familiares do município de Erechim, Rio Grande do Sul, comparando os resultados obtidos com os limites estabelecidos pela legislação brasileira e com dados reportados na literatura científica.

Metodologia

Foram analisadas quatro amostras de vinhos tintos artesanais produzidos por agricultores familiares do município de Erechim, Rio Grande do Sul, Brasil, adquiridas em feiras livres durante a safra 2025/2026. A seleção das amostras considerou

exclusivamente vinhos tintos identificados como de produção artesanal e elaborados por produtores locais. Três amostras foram produzidas com uvas da cultivar Bordô (amostras 1, 2 e 3) e uma com uvas da cultivar Isabel (amostra 4), utilizada como referência comparativa.

Após a aquisição, as amostras foram codificadas e armazenadas ao abrigo da luz, em temperatura controlada (15–20 °C). Após a abertura das garrafas, permaneceram refrigeradas e foram analisadas em até 48 horas, minimizando alterações oxidativas e perdas de compostos voláteis. Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

Caracterização físico-química

As análises físico-químicas seguiram os procedimentos estabelecidos pela Instrução Normativa nº 14/2018 e pela Portaria MAPA nº 723/2024, complementadas pelas metodologias descritas pelo Instituto Adolfo Lutz (2008) e por protocolos amplamente empregados em enologia.

O pH foi determinado por potenciometria direta utilizando pHmetro previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, a 25 ºC.

A acidez total titulável foi determinada pela titulação de 25 mL da amostra, previamente diluída em igual volume de água destilada, com solução padronizada de hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} até pH 8,2. Os resultados foram expressos em mEq L^{-1}.

O teor alcoólico foi determinado em ebuliômetro (Metal. Leonardo, modelo 3300), previamente calibrado com água destilada, sendo os resultados expressos em porcentagem em volume (% v/v).

O extrato seco foi obtido por secagem das amostras em estufa a aproximadamente 105 °C até massa constante, sendo posteriormente convertido para g L^{-1} utilizando a densidade correspondente.

O teor de cinzas foi determinado por calcinação das amostras em mufla a 550 °C até obtenção de resíduo mineral constante, sendo os resultados expressos em g L^{-1}.

A densidade foi determinada empregando picnômetro de 25 mL previamente calibrado com água destilada a 20 °C.

Determinação das antocianinas monoméricas totais

A concentração de antocianinas monoméricas totais foi determinada pelo método do pH diferencial (AOAC 2005.02), conforme descrito por Giusti e Wrolstad (2001).

As amostras foram diluídas em tampão de cloreto de potássio (0,025 mol L^{-1}; pH 1,0) e tampão acetato de sódio (0,4 mol L^{-1}; pH 4,5), utilizando fator de diluição igual a dez.

As leituras espectrofotométricas foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis nos comprimentos de onda de 520 e 700 nm, utilizando cubetas de quartzo de 1 cm de caminho óptico. A absorbância (*A*)corrigida foi calculada segundo a Equação 1.

$$A = (A_{520} - A_{700})_{pH\ 1,0} - (A_{520} - A_{700})_{pH\ 4,5} \qquad \textit{(Equação 1)}$$

Posteriormente, a concentração das antocianinas monoméricas totais (AMT) foi calculada conforme a Equação 2, utilizando massa molar (*MM*) de 449,2 g mol^{-1} e coeficiente de extinção molar (ε) de 26.900 L mol^{-1} cm^{-1}, sendo os resultados expressos em mg L^{-1} de cianidina-3-glicosídeo. A largura da cubeta (*l*) foi de 1 cm.

$$AMT\ (mg\ L^{-1}) = \frac{A \times MM \times FD \times 1000}{\varepsilon \times l} \qquad \textit{(Equação 2)}$$

Os resultados obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pela legislação brasileira vigente e confrontados com dados disponíveis na literatura científica.

Tratamento estatístico

Os resultados, obtidos em triplicata (n = 3), foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey nas comparações múltiplas e pelo teste t de Student nas comparações entre duas médias, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$), com auxílio do software SASM.

Resultados e discussão

Caracterização físico-química dos vinhos artesanais

Os resultados da caracterização físico-química das quatro amostras de vinhos artesanais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicas dos vinhos tintos artesanais

Amostra	pH (25 °C)	Acidez Total (mEq L^{-1})	Extrato Seco (g L^{-1})	Cinzas (g L^{-1})	Densidade (g mL^{-1})	Teor alcoólico (% v/v)
1	$2,94^{b}$ ± 0,05	$137,07^{a}$ ± 0,23	$19,14^{b}$ ± 0,10	$1,83^{a}$ ± 0,38	0,997	$11,30^{a}$ ± 0,15
2	$3,11^{a}$ ± 0,08	$120,80^{c}$ ± 1,06	$17,80^{c}$ ± 0,30	$1,74^{a}$ ± 0,01	0,999	$10,43^{b}$ ± 0,12
3	$3,20^{a}$ ± 0,04	$125,07^{b}$ ± 1,01	$19,91^{a}$ ± 0,13	$1,78^{a}$ ± 0,12	0,999	$11,17^{a}$ ± 0,15
4	$3,21^{a}$ ± 0,03	$116,93^{d}$ ± 1,85	$17,07^{d}$ ± 0,12	$1,41^{a}$ ± 0,02	0,998	$10,13^{b}$ ± 0,15

$^{a-d}$ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p<0,05$), sendo comparadas letras minúsculas entre linhas.

A avaliação dos parâmetros físico-químicos demonstrou que, de maneira geral, os vinhos artesanais produzidos no município de Erechim apresentaram características compatíveis com as de vinhos tintos de mesa, indicando adequada condução do processo fermentativo e conformidade com a maioria dos parâmetros avaliados, embora tenham sido observadas pequenas inconformidades pontuais em algumas amostras (Brasil, 2018).

pH

Os valores de pH variaram entre 2,94 e 3,21, faixa considerada característica para vinhos tintos jovens. Embora a legislação brasileira não estabeleça limites específicos para esse parâmetro, valores próximos de 3,0 são considerados desejáveis por favorecerem a estabilidade microbiológica, a conservação e a intensidade da coloração dos vinhos (Alves *et al.*, 2025). A amostra 1 apresentou o menor valor de pH (2,94), enquanto a amostra 4 apresentou o maior (3,21). Essa diferença provavelmente está relacionada às características intrínsecas das cultivares utilizadas, ao estágio de maturação das uvas e às condições de fermentação (Plantevin *et al.*, 2024).

Além disso, o pH exerce influência direta sobre a forma química das antocianinas. Em meios mais ácidos predominam as formas catiônicas responsáveis pela coloração vermelha intensa, enquanto valores mais elevados favorecem transformações estruturais que reduzem a intensidade da cor (Kontoudakis *et al.*, 2011). Esse comportamento ajuda a explicar, em conjunto com a composição varietal, as diferenças observadas posteriormente na concentração de antocianinas.

Os valores encontrados também são semelhantes aos descritos por Kowal *et al.* (2023) e Wurz *et al.* (2021), que observaram pH entre aproximadamente 2,9 e 3,4 em vinhos tintos produzidos no Sul do Brasil, indicando que os vinhos analisados apresentam comportamento compatível com outras produções nacionais.

Acidez total

A acidez total titulável variou entre 116,9 e 137,1 mEq L^{-1}**,** evidenciando diferenças importantes entre as amostras. Três das quatro amostras apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 2018), enquanto a amostra 1 ultrapassou o limite máximo permitido de 130 mEq L^{-1}, configurando a única inconformidade observada no estudo.

A acidez representa um dos principais parâmetros relacionados à qualidade do vinho, pois influencia diretamente o equilíbrio sensorial, a estabilidade microbiológica e o potencial de envelhecimento. Valores elevados podem conferir excessiva sensação de adstringência e acidez ao produto, enquanto valores muito baixos favorecem alterações microbiológicas e perda de frescor (Rizzon; Miele, 2002).

A maior acidez observada na amostra 1 pode estar associada à colheita em estágio menos avançado de maturação, condição em que as uvas apresentam maiores concentrações de ácido málico, uma vez que esse ácido é progressivamente degradado durante o amadurecimento dos frutos (Volschenk; Van Vuuren; Viljoen-Bloom, 2006). Além disso, diferenças nas práticas de vinificação e no controle do processo fermentativo podem contribuir para variações na acidez dos vinhos, especialmente em produções artesanais, nas quais as características da matéria-prima e as condições tecnológicas tendem a ser menos padronizadas (Kowal *et al.*, 2023).

Embora frequentemente associados, pH e acidez total representam parâmetros distintos. Enquanto o pH expressa a concentração de íons hidrogênio livres na solução, a acidez total corresponde à quantidade total de ácidos tituláveis presentes no vinho. Essa distinção explica por que amostras com valores relativamente próximos de acidez podem apresentar diferenças de pH (Lovato; Wagner, 2012; Rizzon, 2010).

No presente estudo, observa-se tendência inversa entre essas variáveis: a amostra com maior acidez apresentou o menor pH, enquanto a de menor acidez apresentou o maior pH, comportamento esperado para vinhos tintos (Rizzon, 2010). Essa relação demonstra a consistência dos resultados obtidos e reforça a confiabilidade das análises laboratoriais.

Extrato seco

Os valores de extrato seco variaram entre 17,07 e 19,91 g L^{-1}. Esse parâmetro representa a fração não volátil do vinho, composta por açúcares residuais, ácidos orgânicos, sais minerais, compostos fenólicos e outros constituintes dissolvidos. Os resultados obtidos estão dentro da faixa frequentemente descrita para vinhos tintos secos e indicam adequada extração de sólidos durante a maceração (Sacchi; Bisson; Adams, 2005).

A amostra 3 apresentou o maior valor de extrato seco, sugerindo maior eficiência na extração dos compostos presentes nas cascas e sementes durante a vinificação. Essa observação merece destaque quando comparada aos resultados de antocianinas apresentados posteriormente, indicando possível associação entre maior extração da matriz sólida da uva e maior concentração de pigmentos fenólicos.

Cinzas

Os teores de cinzas oscilaram entre 1,41 e 1,83 g L^{-1}, refletindo diferenças na composição mineral das amostras. As cinzas representam o resíduo mineral remanescente após a calcinação da matéria orgânica, sendo sua composição influenciada principalmente pela cultivar, pelas características do solo, pelas práticas de manejo e pelas condições climáticas da região produtora (Cavanholi *et al.*, 2025; Ribéreau-Gayon *et al.*, 2006). Os valores observados são compatíveis com os valores reportados para vinhos tintos brasileiros, que geralmente variam entre

aproximadamente 1,5 e 2,5 g L^{-1}, embora a amostra 4 tenha apresentado valor discretamente inferior ao mínimo de 1,5 g L^{-1} estabelecido pela legislação brasileira.

Densidade

A densidade apresentou pequena variação (0,997–0,999 g mL^{-1}), indicando elevada uniformidade entre as amostras. Esse comportamento era esperado considerando as pequenas variações no teor alcoólico e a proximidade entre os valores de extrato seco. Os valores observados foram semelhantes aos reportados por Kowal *et al.*, (2023) para vinhos tintos de mesa produzidos no Sul do Brasil e são compatíveis com a faixa descrita para vinhos comerciais, sugerindo adequada condução da fermentação alcoólica (Neto *et al.*, 2015).

Teor alcoólico

O teor alcoólico variou de 10,1 a 11,3% (v/v). Todas as amostras atenderam aos limites estabelecidos pela legislação brasileira para vinhos de mesa (Brasil, 2018), demonstrando que o processo fermentativo ocorreu adequadamente. A pequena amplitude observada sugere que as uvas utilizadas apresentavam composição relativamente semelhante e que o processo fermentativo ocorreu de forma satisfatória nas diferentes propriedades (Cavanholi *et al.*, 2025). Esse resultado é particularmente relevante, pois demonstra que pequenas vinícolas familiares conseguem atingir parâmetros tecnológicos comparáveis aos observados em produções comerciais quando adotam boas práticas de elaboração.

Antocianinas monoméricas totais

Os resultados referentes à absorbância corrigida e às concentrações de antocianinas monoméricas totais encontram-se apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de antocianinas monoméricas totais (AMT)

Amostra	AMT (mg L^{-1})*
1	$250,15^{b} \pm 0,45$
2	$238,13^{c} \pm 0,23$
3	$257,16^{a} \pm 0,15$
4	$42,08^{d} \pm 0,78$

*Valores indicados em mg L^{-1} de cianidina-3-glicosídeo. $^{a-d}$ Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p<0,05$), sendo comparadas letras minúsculas entre linhas.

As concentrações de antocianinas monoméricas totais variaram de 42,08 a 257,16 mg L^{-1}, evidenciando diferenças expressivas entre as cultivares avaliadas. As três amostras produzidas com a cultivar Bordô apresentaram concentrações semelhantes, entre 238,13 e 257,16 mg L^{-1}, enquanto o vinho elaborado com a cultivar Isabel apresentou 42,08 mg L^{-1}, valor aproximadamente seis vezes inferior.

Esses resultados corroboram a literatura, que demonstra que a composição fenólica dos vinhos é fortemente influenciada pela cultivar, constituindo um dos principais fatores responsáveis pelas diferenças de coloração, estabilidade cromática e capacidade antioxidante (He *et al.*, 2010; Neira-Ospina *et al.*, 2024). As maiores concentrações observadas nos vinhos elaborados com a cultivar Bordô são compatíveis com estudos que descrevem essa cultivar como naturalmente mais rica em antocianinas quando comparada à Isabel (Brighenti *et al.*, 2018; Nixdorf; Hermosín-Gutiérrez, 2010).

Embora a composição genética da cultivar exerça papel predominante na concentração desses pigmentos, fatores tecnológicos, como tempo de maceração, temperatura de fermentação e condições de vinificação, também influenciam sua extração, uma vez que as antocianinas estão localizadas principalmente nas cascas das uvas (Ribéreau-Gayon *et al.*, 2006). Nesse contexto, a amostra 3 apresentou simultaneamente o maior teor de extrato seco e a maior concentração de antocianinas, sugerindo maior extração de constituintes da casca durante a maceração. Embora essa associação não permita estabelecer relação de causalidade, ela é compatível com o comportamento descrito para vinhos tintos, nos quais maior extração da fração sólida favorece o aumento da concentração de compostos fenólicos (He *et al.*, 2010; Ribéreau-Gayon *et al.*, 2006).

Os valores de pH observados (2,94–3,21) situaram-se em uma faixa considerada favorável à estabilidade das antocianinas, uma vez que meios mais ácidos preservam as formas catiônicas responsáveis pela coloração vermelho-intensa dos vinhos tintos (He *et al.*, 2010; Ribéreau-Gayon *et al.*, 2006). Como as variações de pH entre as amostras foram relativamente pequenas, a expressiva diferença na concentração de antocianinas entre os vinhos Bordô e Isabel é atribuída principalmente ao efeito da cultivar (Nixdorf; Hermosín-Gutiérrez, 2010; Neira-Ospina *et al.*, 2024).

Sob a perspectiva tecnológica, a determinação das antocianinas constitui importante ferramenta para a caracterização da qualidade dos vinhos tintos, por estar relacionada à intensidade da coloração, à estabilidade cromática e ao potencial antioxidante. Embora a legislação brasileira não estabeleça limites para esses compostos, sua quantificação fornece informações relevantes sobre a composição fenólica e pode contribuir para o controle de qualidade e a valorização de vinhos artesanais (Ribéreau-Gayon *et al.*, 2006; Neira-Ospina *et al.*, 2024; Brasil, 2018; OIV, 2021).

Considerações finais

Os resultados obtidos indicam que os vinhos artesanais produzidos por agricultores familiares do município de Erechim apresentaram, em sua maioria, parâmetros compatíveis com os Padrões de Identidade e Qualidade estabelecidos pela legislação brasileira para vinhos tintos de mesa. Apenas uma amostra apresentou acidez total superior ao limite regulamentar e outra apresentou teor de cinzas

discretamente inferior ao valor mínimo estabelecido pela legislação, evidenciando a importância do monitoramento analítico durante o processo de vinificação.

As diferenças observadas entre os vinhos elaborados com as cultivares Bordô e Isabel evidenciaram a influência da cultivar sobre a composição físico-química e fenólica dos produtos. Os vinhos produzidos com a cultivar Bordô apresentaram maiores concentrações de antocianinas monoméricas totais, indicando maior potencial para a produção de vinhos com coloração mais intensa e maior estabilidade cromática. Assim, os objetivos propostos foram alcançados, permitindo caracterizar os parâmetros físico-químicos dos vinhos artesanais avaliados e indicar a influência da cultivar sobre as diferenças observadas na concentração de antocianinas monoméricas totais.

Em conjunto, os resultados obtidos reforçam a adequada qualidade tecnológica das amostras analisadas e evidenciam o potencial dos vinhos artesanais produzidos por agricultores familiares da região de Erechim.

Este estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre a vitivinicultura regional, fornecendo informações que podem subsidiar ações de assistência técnica, controle de qualidade e agregação de valor aos produtos da agricultura familiar. Nesse contexto, o monitoramento sistemático dos parâmetros físico-químicos e da composição fenólica constitui importante ferramenta para a padronização da produção e o fortalecimento da competitividade dos pequenos produtores.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros ampliem o número de amostras analisadas, contemplem diferentes safras e incluam análises complementares, como a determinação individual de compostos fenólicos por técnicas cromatográficas, a avaliação da capacidade antioxidante e análises sensoriais. Essas abordagens contribuirão para uma compreensão mais abrangente da qualidade dos vinhos artesanais produzidos na região e para o aprimoramento dos processos produtivos da vitivinicultura regional, especialmente no contexto da agricultura familiar.

Notas

*Este trabalho é resultado de uma pesquisa desenvolvida pela acadêmica durante sua formação no curso de Engenharia Química, não tendo sido apresentado ou defendido como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

*Durante a preparação deste trabalho, os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI) como ferramenta de apoio à revisão da linguagem, visando aprimorar a clareza, a gramática e a legibilidade do manuscrito. Todo o conteúdo foi revisado e validado pelos autores, que assumem integral responsabilidade pelo conteúdo científico e pelas conclusões apresentadas.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. A. N. *et al.* Exploring the impact of elevated pH and short maceration on the physicochemical stability and phenolic composition of tropical red wines. **OENO One**, v. 59, n. 1, Article 8111, 2025. DOI: https://doi.org/10.20870/oeno-one.2025.59.1.8111.

AOAC. **Official Method 2005.02 - Total monomeric anthocyanins in fruits and fruit juices.** Gaithersburg: AOAC International, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Portaria nº 723, de 22 de abril de 2024.** Altera a Instrução Normativa nº 14/2018, que estabelece os padrões de identidade e qualidade para vinho e derivados da uva e do vinho. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 14, de 8 de fevereiro de 2018.** Estabelece os padrões de identidade e qualidade para vinho e derivados da uva e do vinho. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 09 fev. 2018.

BRIGHENTI, A. F.; ALLEBRANDT, R.; MUNHOZ, B.; MATOS, D. P.; REGINA, M. A.; SILVA, A. L. Qualification of 'Bordô' grape clones in Vale do Rio do Peixe, in the state of Santa Catarina, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira***,* v. 53, n. 7, p. 800-808, 2018. DOI:https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000700003.

CAVANHOLI, M. G. *et al.* How do pH reduction and the addition of potassium metabisulfite impact colour and the phenolic and anthocyanin profiles in red araçá (*Psidium cattleianum* Sabine) wine? **South African Journal of Botany**, v. 177, p. 251-263, 2025. DOI:https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.12.005.

HE, F.; MU, L.; YAN, G. L. *et al.* Biosynthesis of anthocyanins and their regulation in colored grapes. **Molecules**, v. 15, n. 12, p. 9057-9091, 2010. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules15129057.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** 4. ed. São Paulo: IAL, 2008.

GIUSTI, M. M.; WROLSTAD, R. E. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. In: WROLSTAD, R. E. (ed.). **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. Unit F1.2, p. F1.2.1-F1.2.13. DOI: https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00.

JACKSON, R. S. **Wine Science:** Principles and Applications. 5. ed. London: Academic Press, 2020.

KOWAL, A. N. *et al.* Physical-chemical characterization of red table wines produced in the Planalto Norte region of Santa Catarina, harvest 2022. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 22, n. 4, p. 546-553, 2023. DOI: https://doi.org/10.5965/223811712242023546.

LOVATO, M. A.; WAGNER, R. Avaliação da qualidade do vinho de mesa suave por análises físico-químicas. **Cadernos da Escola de Saúde**, Curitiba, n. 8, p. 168-178, 2012.

LUQUESI, C. M. S.; FERRAREZI JUNIOR, E. The importance of the artisan wine agroindustry. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 19, n. 2, p. 608-619, 2022. DOI: https://doi.org/10.31510/infa.v19i2.1460.

NEIRA-OSPINA, E.; ROJAS, J.; SANTA-GONZÁLEZ, G. A.; GARZÓN, M. A. G. Phenolic compounds in grapes (genus Vitis): a review of their antioxidant activity, antiproliferative capacity, and cytotoxic effect on colorectal *cancer*. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 14, n. 6, p. 71-89, 2024. DOI: https://doi.org/10.7324/JAPS.2024.169381.

NETO, F. S. P. *et al.* Effect of ethanol, dry extract and reducing sugars on density and viscosity of Brazilian red wines. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 7, p. 1421-1427, 2015. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.6835.

NIXDORF, S. L.; HERMOSÍN-GUTIÉRREZ, I. Brazilian red wines made from the hybrid grape cultivar Isabel: phenolic composition and antioxidant capacity. **Analytica Chimica Acta**, v. 659, n. 1-2, p. 208-215, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.11.058.

OIV – Organisation Internationale de la Vigne et du Vin. **Compendium of International Methods of Analysis of Wines and Musts**. Paris: OIV, 2021.

OPENAI. **ChatGPT**. Modelo de linguagem baseado em inteligência artificial. Disponível em: https://chat.openai.com. Acesso em: 12 jun. 2026.

KONTOUDAKIS, N. *et al.* Influence of wine pH on changes in color and polyphenol composition induced by micro-oxygenation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, p. 1974-1984, 2011. DOI: https://doi.org/10.1021/jf103038g.

PLANTEVIN, M. *et al.* Characterization of varietal effects on the acidity and pH dynamics of grape berries throughout ripening. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, Article 1439114, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1439114.

RIBÉREAU-GAYON, P.; GLORIES, Y.; MAUJEAN, A.; DUBOURDIEU, D. **Handbook of Enology***:* The Chemistry of Wine: Stabilization and Treatments*.* Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

RIZZON, L. A. **Metodologia para análise de vinho**. Brasília, DF:Embrapa Informação Tecnológica, 2010.

RIZZON, L. A.; MIELE, A. Acidez na vinificação em tinto das uvas Isabel, Cabernet Sauvignon e Cabernet Franc. **Ciência Rural**, v. 32, n. 3, p. 511-515, 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000300023.

SACCHI, K. L.; BISSON, L. F.; ADAMS, D. O. A review of the effect of winemaking techniques on phenolic extraction in red wines. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 56, n. 3, p. 197-206, 2005. DOI: https://doi.org/10.5344/ajev.2005.56.3.197.

VOLSCHENK, H.; VAN VUUREN, H. J. J.; VILJOEN-BLOOM, M. Malic acid in wine: origin, function and metabolism during vinification. **South African Journal of Enology and Viticulture**, v. 27, n. 2, p. 123-136, 2006. DOI: https://doi.org/10.21548/27-2-1613.

WURZ, D. A. *et al.* Caracterização físico-química de vinhos de mesa tintos elaborados na região do Planalto Norte Catarinense, safra 2019. **Revista de Ciência e Inovação**, v. 7, p. 1-16, 2021. DOI:https://doi.org/10.26669/2448-4091.2021.312.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DO IPÊ-ROXO (*Handroanthus heptaphyllus*): UMA REVISÃO

Guilherme Henrique Mazetto[1], Lucas Henrique do Nascimento[2], Jamile Zeni[3]

[1]Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI) – guilhermemazetto2011@gmail.com
[2]Doutorando em Engenharia de Alimentos (URI) – lucashenryque.nascimento@gmail.com
[3]Profª. Drª. do Curso de Engenharia Química (URI) – jamilezeni@uricer.edu.br

RESUMO: O ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus*), espécie pertencente à família Bignoniaceae, destaca-se pela ampla utilização na medicina tradicional e pelo elevado potencial como fonte de compostos bioativos. Esses compostos, especialmente naftoquinonas, flavonoides e fenólicos, apresentam diversas atividades biológicas, incluindo propriedades antioxidantes, antimicrobianas, anti-inflamatórias e antitumorais, o que tem despertado crescente interesse científico e industrial. Nesse contexto, a eficiência dos processos de extração torna-se um fator determinante para a obtenção de extratos com alta qualidade e atividade biológica. O presente trabalho teve como objetivo revisar os principais métodos de extração aplicados aos compostos bioativos do ipê-roxo, abordando tanto técnicas convencionais quanto tecnologias emergentes. Foram discutidos os fundamentos teóricos, as variáveis operacionais e os impactos desses métodos sobre o rendimento, a seletividade e a estabilidade dos compostos extraídos. Além disso, o estudo enfatiza a crescente adoção de abordagens sustentáveis, alinhadas aos princípios da extração verde, incluindo o uso de solventes ecológicos e técnicas assistidas por ultrassom, micro-ondas e fluidos pressurizados. Também são abordadas tendências atuais, como a integração em sistemas de biorrefinaria vegetal e o uso de estratégias de encapsulação para aumentar a estabilidade e a biodisponibilidade dos compostos. De forma geral, os avanços na área indicam que a escolha adequada do método de extração, aliada a tecnologias

sustentáveis, é essencial para maximizar o aproveitamento do potencial bioativo do ipê-roxo e viabilizar sua aplicação em escala industrial.

Palavras-chave: *Handroanthus heptaphyllus*. Compostos bioativos. Extração verde. Biorrefinaria vegetal. Tecnologias emergentes.

Introdução

O ipê-roxo-de-sete-folhas (*Handroanthus heptaphyllus*), pertencente à família Bignoniaceae, é uma espécie amplamente distribuída na América Latina, com destaque para sua ocorrência em diferentes biomas brasileiros. Além de sua importância ecológica e madeireira, essa espécie possui longa tradição de uso na medicina popular, especialmente na forma de infusões e decocções de sua casca. Esse uso empírico tem motivado diversos estudos científicos voltados à caracterização de seus constituintes químicos e à validação de suas propriedades biológicas. Nesse sentido, destaca-se a presença de metabólitos secundários, como naftoquinonas (ex.: lapachol), flavonoides, compostos fenólicos e polissacarídeos, associados a atividades anti-inflamatórias, antimicrobianas, antioxidantes, antitumorais e antidiabéticas (Carlotto *et al.,* 2020; Grochanke *et al.,* 2016).

Nas últimas décadas, a prospecção de compostos bioativos de origem vegetal tem assumido papel estratégico tanto na pesquisa científica quanto no desenvolvimento industrial. Esse interesse crescente está diretamente relacionado à demanda por ingredientes naturais, mais seguros e sustentáveis, aplicáveis nos setores farmacêutico, nutracêutico, cosmético e alimentício. Paralelamente, o aproveitamento de recursos vegetais, incluindo resíduos agroindustriais, tem se consolidado como uma alternativa promissora dentro do contexto da bioeconomia, agregando valor a matérias-primas antes subutilizadas.

Nesse cenário, a etapa de extração dos compostos bioativos emerge como um dos pontos mais críticos de todo o processo, uma vez que influencia diretamente a qualidade, a composição química e a atividade biológica dos extratos obtidos. A eficiência da extração depende de uma série de fatores inter-relacionados, como o tipo de solvente utilizado, a polaridade dos compostos de interesse, a temperatura, o tempo de processamento e as características físicas e estruturais da matriz vegetal. Métodos convencionais, como maceração e extração Soxhlet, ainda são amplamente utilizados, porém apresentam limitações relacionadas ao elevado consumo de solventes, maior tempo de processamento e possível degradação de compostos termossensíveis.

Diante dessas limitações, observa-se uma transição crescente para o uso de tecnologias emergentes alinhadas aos princípios da extração verde. Essas abordagens buscam não apenas melhorar o rendimento e a seletividade dos processos, mas também reduzir impactos ambientais e aumentar a segurança operacional. Entre as principais estratégias destacam-se o uso de solventes ecológicos, como líquidos

iônicos, solventes eutéticos naturais profundos (NADES) e dióxido de carbono supercrítico, bem como a aplicação de tecnologias emergentes como ultrassom, micro-ondas e fluidos pressurizados (Martins *et al.,* 2023).

Além disso, uma tendência relevante é a integração desses processos em sistemas de biorrefinaria vegetal, nos quais a biomassa é aproveitada de forma integral e sequencial, permitindo a obtenção de múltiplos produtos de valor agregado, como compostos bioativos, biomateriais e energia. Essa abordagem contribui para a redução de resíduos e para a construção de cadeias produtivas mais sustentáveis, em consonância com os princípios da economia circular (Kagueyama *et al.,* 2025).

Outro aspecto que tem ganhado destaque é a necessidade de aumentar a estabilidade e a biodisponibilidade dos compostos extraídos, especialmente quando se consideram aplicações em alimentos funcionais e produtos farmacêuticos. Nesse contexto, técnicas como a micro e nanoencapsulação vêm sendo amplamente exploradas, pois permitem proteger os compostos contra degradação e modular sua liberação, ampliando sua eficácia e aplicabilidade tecnológica.

Dessa forma, considerando o potencial bioativo do ipê-roxo-de-sete-folhas e os avanços recentes nas tecnologias de extração e aplicação de compostos naturais, torna-se fundamental compreender como diferentes métodos influenciam a obtenção desses compostos e suas propriedades. Assim, o presente trabalho tem como objetivo revisar os principais métodos de extração aplicados aos compostos bioativos de *Handroanthus heptaphyllus*, abordando seus fundamentos teóricos, vantagens e limitações, bem como discutindo suas perspectivas de aplicação em escala industrial à luz das tendências atuais de sustentabilidade, inovação tecnológica e valorização de recursos naturais.

Caracterização botânica e fitoquímica de *Handroanthus heptaphyllus* (ipê-roxo)

Handroanthus heptaphyllus (Mart.) Mattos*,* integrante da família Bignoniaceae, caracteriza-se como uma espécie arbórea caducifólia e heliófita de médio a grande porte, amplamente encontrada em ecossistemas neotropicais da América do Sul. Sua distribuição ocorre principalmente em formações florestais estacionais e áreas de cerrado no Brasil, Paraguai, Argentina e Bolívia. Morfologicamente, apresenta tronco reto, casca espessa com fissuras pronunciadas, folhas compostas formadas por sete folíolos e inflorescências terminais compostas por flores zigomorfas de intensa coloração arroxeada. Ecologicamente, a espécie possui papel importante em processos de sucessão secundária e na conservação da biodiversidade, além de apresentar reconhecida relevância etnofarmacológica devido ao seu uso tradicional em práticas medicinais populares (Lorenzi, 1992; Gentry, 1992).

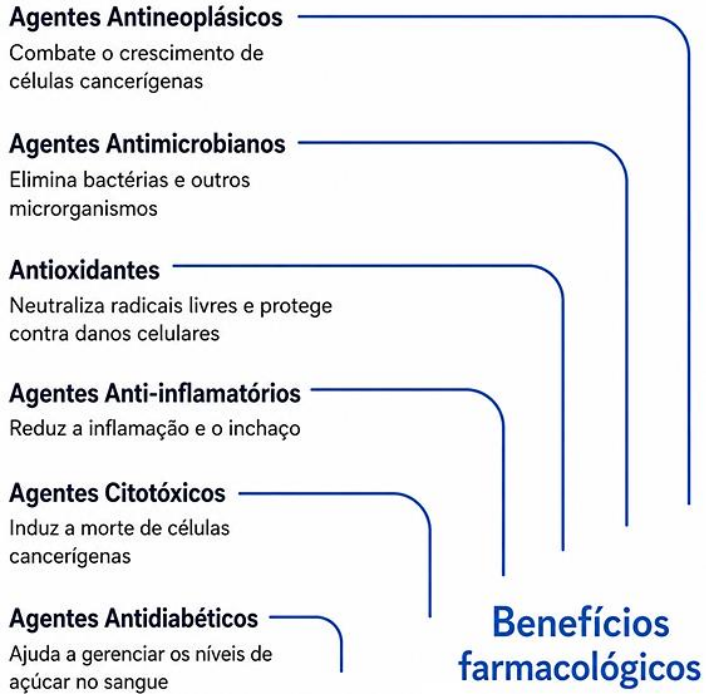
A casca do tronco constitui a principal droga vegetal empregada, sendo caracterizada pela presença de diferentes metabólitos secundários, com destaque para naftoquinonas, flavonoides, compostos fenólicos e taninos. Esses metabólitos são biossintetizados por diferentes rotas metabólicas vegetais e estão associados às

propriedades biológicas atribuídas à espécie. Dentre esses metabólitos, destacam-se as naftoquinonas, especialmente o lapachol e a β-lapachona, consideradas os principais marcadores químicos do gênero *Handroanthus*. Esses compostos apresentam elevada relevância farmacológica devido às suas propriedades antimicrobianas, antioxidantes, anti-inflamatórias e antitumorais, sendo amplamente investigados como moléculas de interesse para aplicações farmacêuticas e biotecnológicas.

Além das naftoquinonas, *H. heptaphyllus* apresenta uma diversidade de compostos fenólicos, incluindo flavonoides (como quercetina e luteolina), taninos condensados e hidrolisáveis, além de ácidos fenólicos (como ácido cafeico e ácido ferúlico). Esses compostos estão associados a atividades antioxidantes por meio da neutralização de radicais livres e da quelagem de íons metálicos, bem como a efeitos antimicrobianos, anti-inflamatórios e citotóxicos. Evidências experimentais sugerem que a ação sinérgica entre esses metabólitos contribui significativamente para o perfil farmacológico da espécie, reforçando seu potencial biotecnológico e terapêutico (Carlotto *et al.,* 2020; Grochanke *et al.,* 2016).

A Figura 1 apresenta uma síntese dos principais benefícios farmacológicos associados aos compostos bioativos de *Handroanthus heptaphyllus*, destacando suas atividades antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória, citotóxica, antineoplásica e antidiabética.

Figura 1. Principais benefícios farmacológicos associados aos compostos bioativos de *Handroanthus heptaphyllus* (ipê-roxo)



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI, 2026).

Estudos recentes ampliaram o espectro farmacológico de *Handroanthus heptaphyllus*, ao revelar polissacarídeos com atividade citotóxica em linhagens tumorais humanas (Carlotto *et al.,* 2020) e efeitos antidiabéticos em modelos animais tratados com extrato aquoso da casca (Grochanke *et al.,* 2016). Esses resultados evidenciam o potencial da espécie como fonte de compostos bioativos de interesse biotecnológico.

Fundamentos teóricos da extração

A extração de compostos bioativos a partir de matrizes vegetais é baseada em princípios fundamentais de transferência de massa, envolvendo mecanismos simultâneos de difusão molecular, convecção e partição entre fases. Inicialmente, ocorre a penetração do solvente nos poros da matriz sólida, promovida por gradientes de concentração e pressão capilar. Em seguida, os compostos de interesse são solubilizados no solvente, dependendo de interações intermoleculares específicas (como ligações de hidrogênio, forças de van der Waals e interações dipolo-dipolo). Posteriormente, esses solutos difundem-se da matriz vegetal para o meio líquido, processo frequentemente descrito pelas leis de Fick, sendo influenciado pela estrutura celular, pela tortuosidade do meio e pela área superficial disponível (Chemat *et al.,* 2012; Azmir *et al.,* 2013).

A eficiência da extração de compostos bioativos depende de variáveis físico-químicas e operacionais que afetam tanto a transferência de massa quanto o equilíbrio de solubilidade. A polaridade do solvente é determinante para a seletividade, seguindo o princípio de que compostos com características semelhantes tendem a se solubilizar entre si. A temperatura influencia a solubilidade e a difusividade, além de reduzir a viscosidade do solvente, favorecendo sua penetração na matriz. O tempo de extração está relacionado ao alcance do equilíbrio termodinâmico, enquanto a relação sólido-solvente define o gradiente de concentração. A granulometria da amostra afeta a área superficial disponível e a resistência à difusão interna, e o pH pode modificar a ionização de fenólicos e alcaloides, alterando sua solubilidade. Esses fatores foram amplamente discutidos por Dai e Mumper (2010) e complementados por Azwanida (2015), que destaca a importância da preparação adequada da amostra para preservar os fitoquímicos.

A seleção do solvente extrator é um aspecto central no desenho do processo, pois determina não apenas a eficiência, mas também a seletividade e a segurança da extração. Solventes polares, como água e etanol, são amplamente empregados na extração de compostos fenólicos devido à presença de grupos hidroxila que favorecem interações por ligação de hidrogênio. Por outro lado, solventes menos polares, como hexano ou éter de petróleo, são mais adequados para compostos lipofílicos, como carotenoides e ácidos graxos. Além disso, parâmetros como constante dielétrica, índice de polaridade e capacidade de solvatação devem ser considerados na escolha do solvente (Chemat *et al.,* 2012; Dai e Mumper, 2010).

A estabilidade dos compostos bioativos é fortemente influenciada pelas condições operacionais, sobretudo pela temperatura. Compostos sensíveis ao calor, como polifenóis, flavonoides e algumas vitaminas, podem sofrer oxidação ou hidrólise quando submetidos a temperaturas elevadas por períodos prolongados, o que compromete tanto o rendimento quanto a atividade biológica dos extratos. Para superar essas limitações, técnicas modernas como a extração assistida por ultrassom e micro-ondas foram desenvolvidas, permitindo maior eficiência com menor tempo de exposição térmica (Azmir *et al.,* 2013; Chemat *et al.,* 2012).

Métodos convencionais de extração x Métodos assistidos por tecnologias emergentes

Os métodos de extração de compostos bioativos podem ser classificados em duas categorias principais: métodos convencionais e métodos assistidos por tecnologias emergentes. Os métodos convencionais, como maceração, percolação, extração em Soxhlet, decocção e infusão, são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e tradição, embora frequentemente apresentem limitações relacionadas ao tempo de processamento, consumo de solventes e eficiência. Em contraste, os métodos assistidos por tecnologias emergentes, incluindo extração por ultrassom, micro-ondas, dióxido de carbono supercrítico, líquidos pressurizados e água subcrítica, têm sido desenvolvidos com o objetivo de otimizar o rendimento, com potencial para reduzir o impacto ambiental, quando associados ao uso de solventes apropriados e condições operacionais compatíveis com os princípios da química verde.

A maceração consiste na imersão da matriz vegetal pulverizada ou fragmentada em um solvente (geralmente hidroalcoólico ou orgânico) por períodos prolongados, à temperatura ambiente ou controlada, promovendo a difusão passiva dos metabólitos bioativos através das paredes celulares. O processo é regido principalmente pela lei de Fick e pode ser limitado por resistências difusivas internas e externas. Apesar de sua simplicidade e aplicabilidade em larga escala, a maceração apresenta desvantagens importantes, como longos tempos de extração, possível degradação oxidativa e menor eficiência na exaustão da matriz vegetal, resultando em rendimentos inferiores quando comparada a técnicas intensificadas (Azwanida, 2015; Chemat *et al.,* 2012).

A percolação pode ser entendida como uma evolução dinâmica da maceração, na qual o solvente é continuamente renovado ao percolar através de um leito fixo da matriz vegetal. Esse fluxo constante mantém elevado o gradiente de concentração, favorecendo a extração progressiva dos compostos solúveis e aumentando a eficiência do processo. Entretanto, parâmetros como granulometria, taxa de fluxo e polaridade do solvente influenciam significativamente o desempenho, exigindo maior controle experimental (Handa *et al.,* 2008).

A extração em Soxhlet é uma técnica de extração contínua amplamente utilizada em laboratório, baseada na recirculação cíclica de solvente aquecido sob refluxo. Nesse sistema, o solvente evapora, condensa e retorna repetidamente ao compartimento

contendo a amostra, promovendo uma extração quase exaustiva. Trata-se de um método particularmente eficiente para compostos de baixa polaridade, como naftoquinonas e lipídios. Contudo, apresenta limitações relevantes, incluindo elevado consumo de solvente, longo tempo operacional e exposição prolongada a temperaturas elevadas, o que pode ocasionar degradação térmica de compostos termolábeis e reações de oxidação (Luque De Casto E García-Ayuso, 1998; Azwanida, 2015).

Por outro lado, decocção e infusão são métodos tradicionais amplamente empregados na fitoterapia e na medicina popular, baseados na extração aquosa de compostos hidrossolúveis. A decocção envolve fervura prolongada da droga vegetal, sendo mais adequada para partes rígidas (raízes, cascas), enquanto a infusão consiste na adição de água quente sobre a matriz vegetal, sem fervura contínua, sendo aplicada a tecidos mais delicados (folhas, flores). Apesar de sua relevância histórica e cultural, esses métodos apresentam limitações significativas em termos de reprodutibilidade, controle de variáveis (tempo, temperatura, razão sólido/solvente) e padronização dos extratos, o que compromete a consistência fitoquímica e a qualidade dos produtos obtidos (Chemat *et al.,* 2012; Handa *et al.,* 2008).

O desenvolvimento de técnicas avançadas de extração tem sido impulsionado pela necessidade de otimizar o rendimento de compostos bioativos, reduzir o consumo de solventes orgânicos e energia, além de minimizar o tempo de processamento e o impacto ambiental. Nesse contexto, métodos emergentes baseiam-se em princípios físico-químicos intensificados que promovem maior eficiência de transferência de massa e seletividade.

A extração assistida por ultrassom (UAE, Ultrasound-Assisted Extraction) fundamenta-se no fenômeno de cavitação acústica. A propagação de ondas ultrassônicas em meios líquidos gera ciclos de compressão e rarefação, resultando na formação, crescimento e colapso implosivo de microbolhas. Esse colapso produz microjatos e zonas locais de alta temperatura e pressão, que promovem a desestruturação da parede celular vegetal, aumentando a permeabilidade e facilitando a difusão de metabólitos secundários para o solvente. Esse mecanismo resulta em maior eficiência cinética de extração quando comparado a métodos convencionais (Chemat *et al.,* 2012; Vilkhu *et al.,* 2008).

A extração assistida por micro-ondas (MAE, Microwave-Assisted Extraction) utiliza radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas (tipicamente 300 MHz a 300 GHz) para induzir aquecimento dielétrico. Esse aquecimento ocorre pela rotação de dipolos e condução iônica, promovendo elevação rápida e volumétrica da temperatura tanto do solvente quanto da matriz. Como consequência, há aumento da pressão interna nas células vegetais, levando à sua ruptura e à intensificação da transferência de massa. Esse método destaca-se pela redução significativa do tempo de extração e pelo menor consumo de solvente (Routray e Orsat, 2012).

A extração com dióxido de carbono supercrítico (SFE-CO_2, Supercritical Fluid Extraction) emprega CO_2 em condições acima de seu ponto crítico (31,1 °C e 7,38 MPa), onde o fluido apresenta propriedades intermediárias entre gás e líquido, como baixa viscosidade e alta difusividade, aliadas a elevada densidade. Essas características conferem alta capacidade de penetração na matriz e seletividade ajustável por variação de pressão e temperatura. Além disso, trata-se de uma técnica ambientalmente favorável, uma vez que o CO_2 é não tóxico, não inflamável e facilmente removido do extrato final, resultando em produtos de alta pureza (Herrero *et al.,* 2006).

Outras abordagens emergentes incluem a extração com líquidos pressurizados (PLE, Pressurized Liquid Extraction) e a extração com água subcrítica, nas quais solventes são utilizados em condições de alta temperatura e pressão, mantendo-os no estado líquido acima de seus pontos de ebulição atmosféricos. Nessas condições, ocorre modulação das propriedades físico-químicas do solvente (como polaridade e constante dielétrica), favorecendo a solubilização de diferentes classes de compostos. Essas técnicas são consideradas ambientalmente sustentáveis por utilizarem, frequentemente, solventes verdes e apresentarem elevada eficiência e reprodutibilidade (Chemat *et al.,* 2012).

Métodos de extração assistidos por tecnologias emergentes têm se mostrado mais eficientes do que abordagens convencionais, especialmente no rendimento de extração, na preservação estrutural de metabólitos sensíveis e na redução significativa do tempo de processamento. Esses ganhos decorrem de mecanismos físico-químicos intensificados, como a cavitação acústica (ultrassom), o aquecimento dielétrico seletivo (micro-ondas) e a elevada difusividade em condições supercríticas, que promovem maior ruptura das matrizes vegetais e intensificação da transferência de massa. Tais avanços estão em consonância com os princípios da extração verde (Chemat *et al.,* 2012) e com as evidências de desempenho superior relatadas em revisões recentes (Azmir *et al.,* 2013).

Entretanto, métodos convencionais, como maceração e extração Soxhlet, permanecem amplamente empregados em escala laboratorial e industrial. Tal permanência deve-se, principalmente, ao menor custo de implementação, à simplicidade operacional e à ampla padronização normativa, ainda que apresentem desvantagens como maior consumo de solventes, longos tempos de extração e menor seletividade (Wang e Weller, 2006). Assim, a seleção do método de extração deve ser orientada por uma análise multicritério que considere não apenas eficiência, mas também viabilidade econômica, escalabilidade e impacto ambiental.

A comparação sistemática entre diferentes técnicas permite avaliar criticamente suas vantagens e limitações, especialmente sob a perspectiva de intensificação de processos e química verde. De forma geral, métodos assistidos por tecnologias avançadas apresentam maior eficiência global e menor tempo de extração quando comparados aos métodos tradicionais, além de melhor alinhamento com os princípios de sustentabilidade.

Apesar das vantagens inequívocas das tecnologias emergentes, sua adoção em larga escala ainda pode ser limitada por fatores como alto investimento inicial, necessidade de infraestrutura especializada e maior complexidade operacional. Portanto, a escolha do método ideal deve ser fundamentada na finalidade do extrato (por exemplo, aplicações farmacêuticas, alimentícias ou cosméticas), nas propriedades dos compostos alvo e nas condições específicas de aplicação industrial, incluindo requisitos regulatórios e critérios de sustentabilidade.

Otimização de processos de extração

A otimização das condições de extração é uma etapa determinante em processos analíticos e tecnológicos, uma vez que afeta diretamente o rendimento, a seletividade e a estabilidade dos compostos extraídos. Em sistemas complexos, como matrizes vegetais ou alimentares, múltiplos fatores operacionais, incluindo temperatura, tempo de extração, natureza e concentração do solvente, pH e razão sólido-solvente, interagem de forma não linear, tornando inadequadas abordagens univariadas tradicionais, que desconsideram efeitos de interação e podem conduzir a condições subótimas (Chemat *et al.,* 2012; Azmir *et al.,* 2013).

Nesse contexto, a Metodologia de Superfície de Resposta (Response Surface Methodology, RSM) tem se consolidado como uma abordagem estatística avançada para modelagem, otimização e compreensão de processos multivariados. Fundamentada na teoria do planejamento de experimentos (Design of Experiments, DoE), a RSM utiliza modelos polinomiais, tipicamente de segunda ordem, para descrever a relação funcional entre variáveis independentes e respostas de interesse, permitindo não apenas a quantificação dos efeitos principais, mas também a identificação de interações sinérgicas ou antagônicas e de efeitos quadráticos (Bezerra *et al.,* 2008; Myers *et al.,* 2016).

O uso de delineamentos experimentais estruturados, como o Delineamento Composto Central (CCD) e o Box-Behnken, permite explorar o espaço experimental de forma otimizada, obtendo maior quantidade de informação com um número reduzido de ensaios. Essa abordagem é especialmente relevante em processos de extração, nos quais os custos de operação, o consumo de solventes e o risco de degradação de compostos sensíveis tornam inviáveis estratégias univariadas. Como discutido por Ferreira *et al.* (2007), esses delineamentos oferecem maior eficiência estatística e reduzem significativamente o esforço experimental em comparação com métodos tradicionais.

Além da otimização operacional, a RSM contribui para o entendimento mecanístico do processo, permitindo a construção de superfícies de resposta e curvas de contorno que facilitam a visualização das regiões ótimas e das zonas de robustez do sistema. Tal abordagem favorece a transposição de escala (scale-up) e o desenvolvimento de processos sustentáveis, alinhados aos princípios da química verde, ao minimizar o uso de recursos e a geração de resíduos (Chemat *et al.,* 2012).

Em termos práticos, a aplicação da RSM em estudos de extração vai além de uma simples ferramenta de otimização: ela permite compreender de forma mais integrada como as variáveis do processo se relacionam entre si e influenciam os resultados obtidos. Isso se traduz em processos mais eficientes, reprodutíveis e sustentáveis, com melhor aproveitamento de recursos e maior controle sobre a qualidade dos extratos. Assim, o uso dessa abordagem contribui não apenas para alcançar condições ótimas, mas também para desenvolver protocolos mais robustos e cientificamente fundamentados, com maior potencial de aplicação em escala industrial e em diferentes contextos tecnológicos.

Técnicas de caracterização química

Técnicas analíticas instrumentais de alta resolução são amplamente empregadas na caracterização qualitativa e quantitativa de compostos bioativos em matrizes vegetais complexas, incluindo espécies medicinais como o ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus*). A cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) tem sido extensivamente utilizada na separação e quantificação de naftoquinonas (como lapachol e β-lapachona), flavonoides e outros metabólitos secundários presentes na casca e no cerne dessa espécie, frequentemente acoplada a detectores UV-Vis ou espectrometria de massas (LC-MS), aumentando a seletividade e a sensibilidade analítica (Skoog *et al.,* 2007). A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC–MS) é aplicada na identificação de compostos voláteis e semi-voláteis, permitindo a caracterização do perfil fitoquímico de extratos do ipê-roxo com base em padrões de fragmentação (Sparkman *et al.,* 2011).

Métodos espectroscópicos complementares, como a espectrofotometria no ultravioleta-visível (UV-Vis), são utilizados para a determinação quantitativa de compostos fenólicos totais e flavonoides, enquanto a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) fornece informações estruturais a partir das vibrações moleculares características de grupos funcionais, sendo útil na identificação de quinonas e outros constituintes bioativos (Stuart, 2004; Skoog *et al.,* 2007). No caso específico do ipê-roxo, essas abordagens têm sido empregadas de forma integrada para confirmar a presença de compostos como o lapachol e correlacioná-los com atividades biológicas relevantes.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais métodos analíticos empregados na caracterização química de compostos bioativos.

Tabela 1. Principais técnicas de caracterização química aplicadas a compostos bioativos

Característica	Princípio	Aplicação	Referência
HPLC	Separação cromatográfica em fase líquida	Quantificação de naftoquinonas, flavonoides e compostos fenólicos	Skoog *et al.* (2007)
GC-MS	Separação cromatográfica acoplada à espectrometria de massas	Identificação de compostos voláteis e semi-voláteis	Sparkman *et al.* (2011)
V-Vis	Absorção de radiação ultravioleta e visível	Quantificação espectrofotométrica de compostos fenólicos e flavonoides	Singleton *et al.* (1999)
FTIR	Absorção da radiação infravermelha por grupos funcionais	Caracterização estrutural dos compostos	Stuart (2004)

Aplicações biotecnológicas e avaliação biológica

Os extratos obtidos do ipê-roxo *Handroanthus heptaphyllus* (Bignoniaceae) despertam elevado interesse científico em virtude da presença de metabólitos secundários bioativos, como naftoquinonas (lapachol e β-lapachona), flavonoides, compostos fenólicos e polissacarídeos. Esses constituintes estão associados a diversas propriedades farmacológicas, incluindo atividades antimicrobiana, antioxidante, anti-inflamatória, citotóxica e hipoglicemiante (Hussain *et al.,* 2007; Carlotto *et al.,* 2020; Grochanke *et al.,* 2016).

A caracterização do potencial biológico desses extratos envolve tanto a identificação de sua composição química quanto a avaliação de suas atividades funcionais. Nesse contexto, a atividade antioxidante é comumente determinada por ensaios baseados em diferentes mecanismos de neutralização de espécies reativas. Entre os métodos mais empregados destacam-se o DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), que avalia a capacidade de sequestro de radicais livres estáveis por meio da redução da absorbância do radical (Blois, 1958); o ABTS [2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)], fundamentado na redução do cátion radical $ABTS^{\bullet+}$ e aplicável tanto a compostos hidrofílicos quanto lipofílicos (Re *et al.,* 1999); e o FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power), que determina o potencial redutor dos antioxidantes pela conversão de íons Fe^{3+} em Fe^{2+} sob condições ácidas (Benzie e Strain, 1996). Em

conjunto, esses ensaios fornecem informações complementares sobre a capacidade antioxidante dos extratos vegetais. A Tabela 2 apresenta os principais métodos empregados na avaliação antioxidante dos extratos de origem vegetal.

Tabela 2. Principais métodos utilizados na avaliação da atividade antioxidante de extratos vegetais

Método	Princípio	Aplicação	Referência
DPPH	Sequestro do radical DPPH•	Avaliação da capacidade antioxidante	Blois (1958)
ABTS	Redução do cátion radical $ABTS^{\bullet+}$	Avaliação da atividade antioxidante em compostos hidrofílicos e lipofílicos	Re *et al.* (1999)
FRAP	Redução de Fe^{3+} para Fe^{2+}	Determinação do poder redutor dos antioxidantes	Benzie e Strain (1996)

Estudos realizados com espécies de ipê-roxo demonstram que a atividade antioxidante está fortemente relacionada ao teor de compostos fenólicos, especialmente flavonoides, além da presença de naftoquinonas como o lapachol e seus derivados. De modo geral, a quantificação desses compostos por técnicas analíticas, como HPLC e espectrofotometria UV-Vis, apresenta boa correlação com os resultados obtidos nos ensaios DPPH, ABTS e FRAP, evidenciando a relação entre composição fitoquímica e capacidade antioxidante (Pietta, 2000; Brand-Williams *et al.,* 1995). Especificamente para *Handroanthus heptaphyllus*, Grochanke *et al.* (2016) confirmaram a presença de flavonoides na casca e observaram efeitos metabólicos benéficos em modelo experimental de diabetes, reforçando a importância da integração entre técnicas de caracterização química e ensaios biológicos na avaliação do potencial farmacológico dessa espécie.

Além da atividade antioxidante, a ação antimicrobiana dos extratos de ipê-roxo está relacionada, principalmente, às naftoquinonas, capazes de induzir desequilíbrios redox e promover estresse oxidativo em microrganismos, comprometendo membranas celulares e enzimas essenciais. Ensaios *in vitro* demonstram atividade frente a bactérias Gram-positivas, Gram-negativas e fungos patogênicos, indicando um amplo espectro de ação. Machado *et al.* (2003) observaram que derivados semissintéticos, como as furanonaftoquinonas, apresentaram valores de concentração inibitória mínima inferiores aos das naftoquinonas naturais, sugerindo que modificações estruturais podem potencializar a atividade antimicrobiana.

Em razão dessas propriedades biológicas, os extratos de ipê-roxo apresentam potencial para diferentes aplicações, incluindo o desenvolvimento de fitoterápicos destinados ao tratamento de infecções e processos inflamatórios, a incorporação em alimentos funcionais com propriedades antioxidantes, a formulação de cosméticos naturais com ação protetora frente ao estresse oxidativo cutâneo e a prospecção de novos agentes farmacológicos, especialmente com potencial antimicrobiano e antitumoral. Entretanto, a exploração sustentável dessas espécies e a padronização dos extratos ainda representam desafios para sua aplicação industrial e clínica, exigindo estudos adicionais sobre toxicidade, biodisponibilidade, eficácia *in vivo* e padronização dos processos de obtenção (Hussain *et al.,* 2007; Machado *et al.,* 2003; Carlotto *et al.,* 2020; Grochanke *et al.,* 2016).

Desafios e lacunas de pesquisa na exploração de compostos bioativos de *Handroanthus heptaphyllus* (ipê-roxo)

Apesar do elevado potencial biológico dos extratos de *Handroanthus heptaphyllus*, ainda existem importantes lacunas científicas que limitam sua aplicação em escala industrial e clínica. A maior parte dos estudos disponíveis concentra-se em *H. impetiginosus*, havendo escassez de investigações específicas sobre *H. heptaphyllus*, o que dificulta a consolidação de dados comparativos entre as espécies (Grochanke *et al.,* 2016).

Outro desafio refere-se à ausência de estudos toxicológicos de longo prazo e de ensaios clínicos controlados, fundamentais para garantir a segurança e eficácia dos extratos em aplicações farmacêuticas e nutracêuticas. Embora estudos recentes indiquem baixa citotoxicidade e efeitos farmacológicos relevantes em modelos animais, ainda não há dados robustos de toxicologia crônica ou ensaios clínicos (Lencina *et al.,* 2026).

A falta de informações sobre farmacocinética e biodisponibilidade dos principais metabólitos secundários também representa uma barreira para o desenvolvimento de produtos padronizados e regulamentados, considerando que fenólicos e quinonas apresentam intensa metabolização e baixa absorção, dificultando a previsão de eficácia em humanos, em analogia a outros compostos descritos na literatura (Pietta, 2000; Shahidi e Ambigaipalan, 2015). Além disso, aspectos relacionados à padronização dos processos de extração e à variabilidade química entre diferentes populações da espécie precisam ser mais bem compreendidos, uma vez que fatores ambientais e genéticos podem influenciar significativamente a composição fitoquímica e, consequentemente, a atividade biológica dos extratos.

Tendências futuras na extração e aplicação de compostos bioativos

As perspectivas de pesquisa e aplicação de *Handroanthus heptaphyllus* estão diretamente relacionadas ao avanço de tecnologias de extração e ao desenvolvimento de estratégias que aumentem a eficiência e a sustentabilidade dos processos. Nesse

contexto, observa-se uma tendência crescente para o uso de métodos de extração verde, como ultrassom, micro-ondas, fluidos pressurizados e solventes alternativos (líquidos iônicos, solventes eutéticos naturais profundos – NADES – e dióxido de carbono supercrítico), que permitem maior seletividade e menor impacto ambiental (Martins *et al.,* 2023; Rodríguez García; Raghavan, 2021; Kagueyama *et al.,* 2025).

A adoção dessas tecnologias, entretanto, não implica automaticamente que o processo possa ser classificado como uma extração verde. Essa classificação depende da análise integrada de fatores como a natureza e a toxicidade dos solventes empregados, o consumo energético, a eficiência de recuperação dos solventes, a geração de resíduos e a produtividade do processo. Dessa forma, a aplicação de métricas de química verde, como o E-factor, a Process Mass Intensity (PMI) e indicadores de eficiência energética, torna-se fundamental para comparar objetivamente diferentes tecnologias e selecionar processos efetivamente sustentáveis, evitando que a classificação de uma tecnologia como "verde" seja baseada exclusivamente no método empregado, sem considerar o conjunto das condições operacionais.

Outra tendência relevante é a integração em biorrefinarias vegetais, nas quais a biomassa é aproveitada de forma integral e sequencial, permitindo a recuperação de diferentes moléculas bioativas, biomateriais e energia. Essa abordagem está em sintonia com os princípios da bioeconomia e da economia circular, favorecendo a minimização de descartes e o fortalecimento da sustentabilidade nas cadeias agroindustriais (Kagueyama *et al.,* 2025).

Paralelamente, técnicas de micro e nanoencapsulação vêm sendo exploradas para aumentar a estabilidade e a biodisponibilidade dos compostos extraídos, protegendo-os contra degradação e modulando sua liberação em sistemas biológicos. É importante destacar que essa estratégia tem sido aplicada em compostos vegetais em geral (Awad *et al.,* 2021), mas ainda não há estudos específicos com *H. heptaphyllus* — trata-se, portanto, de uma extrapolação teórica baseada em resultados de outras matrizes vegetais.

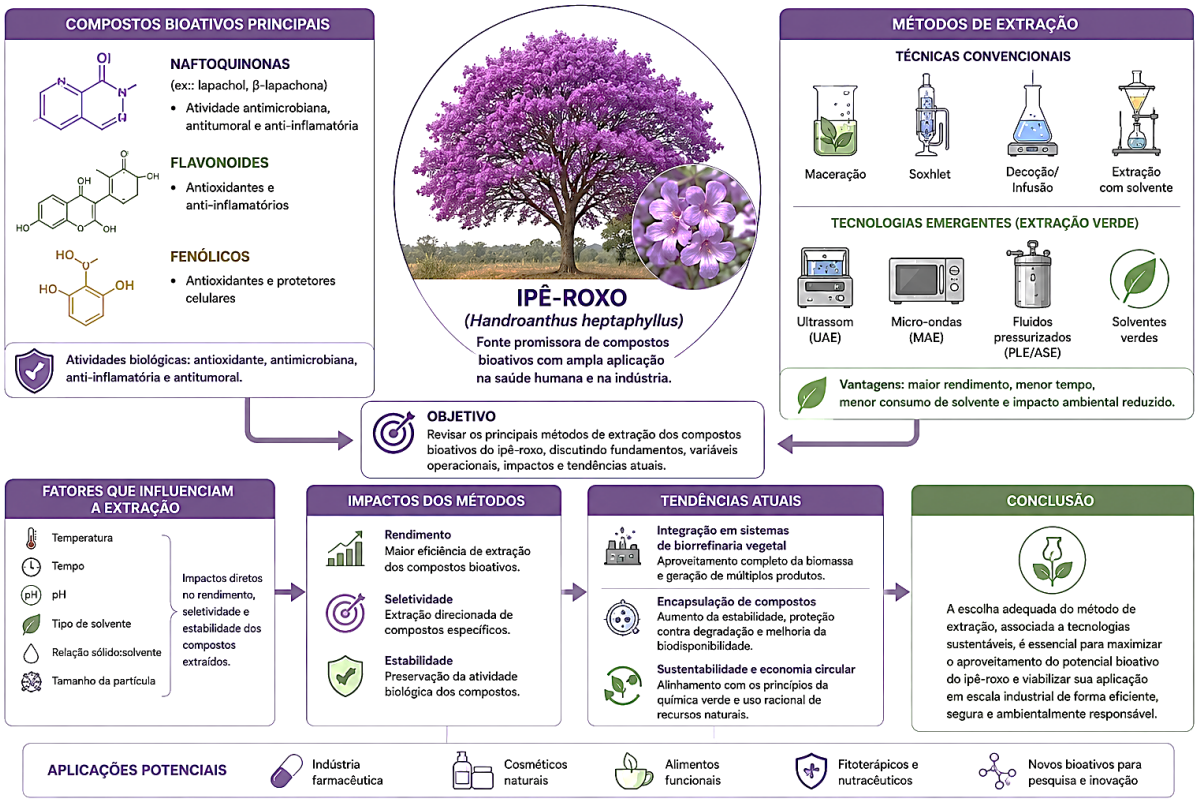
No caso específico de *H. heptaphyllus*, há necessidade de expandir os estudos sobre polissacarídeos e sobre os efeitos metabólicos de seus extratos, especialmente em relação às atividades citotóxicas e antidiabéticas já evidenciadas em modelos experimentais (Carlotto *et al.,* 2020; Grochanke *et al.,* 2016). Esses resultados são promissores, mas ainda restritos a ensaios pré-clínicos, sem validação em humanos.

Por fim, o futuro da exploração dessa espécie depende de práticas de manejo sustentável e cultivo controlado, considerando sua relevância ecológica e o risco de sobrecoleta. A adoção de estratégias de conservação e uso racional é essencial para garantir a disponibilidade da espécie sem comprometer a biodiversidade (Martinelli e Moraes, 2013).

Considerações finais

A análise dos diferentes métodos de extração de compostos bioativos do ipê-roxo evidencia um cenário em constante evolução, no qual as técnicas assistidas por tecnologias emergentes se destacam por sua maior eficiência, menor tempo de processamento e melhor preservação das propriedades dos compostos extraídos. Essas abordagens, especialmente quando associadas ao uso de solventes adequados, ao menor consumo energético e aos princípios da extração verde, representam avanços importantes rumo a processos mais sustentáveis e tecnologicamente otimizados. A Figura 2 apresenta uma visão integrada dos principais compostos bioativos presentes no ipê-roxo, dos métodos de extração convencionais e emergentes, dos fatores que influenciam o processo extrativo e das perspectivas atuais de aplicação industrial e tecnológica.

Figura 2. Compostos bioativos do ipê-roxo (*Handroanthus heptaphyllus*), métodos de extração, fatores que influenciam o processo extrativo e perspectivas de aplicação tecnológica e industrial



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI, 2026).

No entanto, a escolha do método de extração mais adequado não depende apenas de seu desempenho técnico. Aspectos como viabilidade econômica, disponibilidade de infraestrutura e a finalidade de aplicação dos extratos continuam

sendo determinantes nesse processo decisório. Dessa forma, a adoção dessas tecnologias deve ser analisada de maneira integrada, considerando tanto os benefícios operacionais quanto as limitações práticas.

Além disso, o potencial do ipê-roxo como fonte de compostos bioativos reforça sua relevância científica e industrial, especialmente nas áreas alimentícia e farmacêutica. Nesse contexto, estratégias complementares, como o uso de solventes ecológicos, a integração em biorrefinarias e o emprego de técnicas de encapsulação, tendem a ampliar ainda mais as possibilidades de aplicação e a eficiência dos compostos obtidos.

Por fim, torna-se fundamental que pesquisas futuras avancem na padronização dos métodos de extração, na viabilização de sua aplicação em escala industrial e na consolidação de abordagens sustentáveis. Também são necessários estudos mais aprofundados sobre a segurança, estabilidade e biodisponibilidade dos extratos, de modo a garantir sua eficácia e ampliar sua inserção em produtos que atendam às demandas atuais da indústria e da sociedade.

Declaração sobre o uso de IA generativa e tecnologias assistidas por IA no processo de escrita

Durante a preparação deste trabalho, os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI) para auxiliar no aprimoramento da linguagem, melhorando a clareza, a gramática e a legibilidade do manuscrito, bem como para ajudar a resumir e organizar ideias complexas durante o processo de redação. Além disso, ferramentas assistidas por IA foram utilizadas para apoiar o desenvolvimento de layouts conceituais e a organização visual de elementos gráficos (por exemplo, resumo gráfico e figuras). Essas ferramentas foram utilizadas apenas para suporte ao design, de maneira análoga ao uso de recursos gráficos de outras plataformas, enquanto todo o conteúdo científico, a interpretação e a composição das figuras foram totalmente desenvolvidos e finalizados pelos autores. Todo o conteúdo gerado com o auxílio da IA foi cuidadosamente revisado, editado e validado pelos autores para garantir precisão, originalidade e consistência com o conteúdo científico do manuscrito. Os autores assumem total responsabilidade pelo conteúdo do manuscrito, incluindo a integridade da interpretação científica, das figuras e das conclusões apresentadas na publicação.

REFERÊNCIAS

AWAD, A. M. *et al.* Green extraction of bioactive compounds from plant biomass and their application in meat as natural antioxidant. **Antioxidants**, v. 10, n. 9, p. 1465, 2021. DOI: 10.3390/antiox10091465

AZMIR, J. *et al.* Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review. **Journal of Food Engineering***,* v. 117, n. 4, p. 426-436, 2013. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014

AZWANIDA, N. N. A review on the extraction methods used in medicinal plants: principle, strength and limitation. **Medicinal & Aromatic Plants***,* v. 4, n. 3, p. 196, 2015. DOI: 10.4172/2167-0412.1000196

BENZIE, I. F. F.; STRAIN, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power". **Analytical Biochemistry**, v. 239, n. 1, p. 70-76, 1996. DOI: 10.1006/abio.1996.0292

BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965-977, 2008. DOI: 10.1016/j.talanta.2008.05.019.

BLOIS, M. S. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. ***Nature***, v. 181, p. 1199–1200, 1958. DOI: 10.1038/1811199a0

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT – Food Science and Tecnology**, v. 28, p. 25-30, 1995. DOI: 10.1016/S0023-6438(95)80008-5

CARLOTTO, J.; VEIGA, A. A.; SOUZA, L. M.; CIPRIANI, T. R. Polysaccharide fractions from *Handroanthus heptaphyllus* and *Handroanthus albus barks*: structural characterization and cytotoxic activity. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 849–856, 2020. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.218.

CHEMAT, F.; VIAN, M. A.; CRAVOTTO, G. Green extraction of natural products: concept and principles. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 13, n. 7, p. 8615–8627, 2012. DOI: 10.3390/ijms13078615

DAI, J.; MUMPER, R. J. Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. ***Molecules***, v. 15, n. 10, p. 7313-7352, 2010. DOI: 10.3390/molecules15107313

FERREIRA, S. L. C.; BRAGA, J. W. B.; SANTOS, W. P. C.; LOPES, J. A.; SILVA, E. G. P.; SILVA, L. O. B. Box–Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. **Analytica Chimica Acta**, v. 597, n. 2, p. 179-186, 2007. DOI: 10.1016/j.aca.2007.07.011.

GENTRY, A. H. *Bignoniaceae* –Part II (*Tribe Tecomeae*). **Flora Neotropica Monograph**, n. 25(2). Nova Iórque: New York Botanical Garden, 1992.

GROCHANKE, B. S.; GEHRKE, I. T. S.; GOETTEMS-FIORIN, P. B.; BRUXEL, M. A.; BASSO, E. G. P.; HECK, T. G.; LUDWIG, M. S. Compostos fenólicos da casca de *Handroanthus*

heptaphyllus (Mart.) Mattos e efeitos do extrato aquoso no perfil lipídico, glicêmico e na lipoperoxidação em ratos diabéticos. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 18, supl. 1, p. 264-272, 2016. DOI: 10.1590/1983-084x/15_129.

HANDA, S. S.; KHANNA, R.; LONGO, G.; RANGARI, V. D. **Extraction technologies for medicinal and aromatic plants**. Trieste: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO); International Centre for Science and High Technology (ICS-UNIDO), 2008.

HERRERO, M.; CIFUENTES, A.; IBÁÑEZ, E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: plants, food-by-products, algae and microalgae – **A review. Food Chemistry**, v. 98, n. 1, p. 136-148, 2006. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.05.058

HUSSAIN, H. *et al.* Lapachol: an overview. **ARKIVOC**, v. 2007, n. 2, p. 145-171, 2007.

KAGUEYAMA, S. S. *et al.* Green extraction of bioactive compounds from plant-based agri-food residues: advances toward sustainable valorization. **Plants**, v. 14, n. 23, p. 3597, 2025. DOI: 10.3390/plants14233597

LENCINA, C. L. *et al.* Anti-inflammatory and antinociceptive properties of *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos hydroethanolic extract bark in mice. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 310, p. 116-124, 2026.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 1. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 1992.

LUQUE DE CASTRO, M. D.; GARCÍA-AYUSO, L. E. Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. **Analytica Chimica Acta**, v. 369, n. 1-2, p. 1-10, 1998. DOI: 10.1016/S0003-2670(98)00233-5

MACHADO, T. B. *et al. In vitro* activity of Brazilian medicinal plants, naturally occurring naphthoquinones and their analogues, against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. **International Journal of Antimicrobial Agents**, v. 21, n. 3, p. 279-284, 2003. DOI: 10.1016/S0924-8579(02)00349-7

MARTINELLI, G.; MORAES, M. A. (org.). **Livro Vermelho da Flora do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013.

MARTINS, R. *et al.* Green extraction techniques of bioactive compounds: a state-of-the-art review. **Processes**, v. 11, n. 8, p. 2255, 2023. DOI: 10.3390/pr11082255

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology:** Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

PIETTA, P. G. Flavonoids as Antioxiodants. **Journal of Natural Products**, v. 63, n. 7, p. 1035-1042, 2000. DOI: 10.1021/np9904509

RE, R. *et al.* Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 26, n. 9-10, p. 1231-1237, 1999. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3

RODRÍGUEZ GARCÍA, S. L.; RAGHAVAN, V. Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds — A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 23, p. 6446-6466, 2021. DOI: 10.1080/10408398.2021.1901651.

ROUTRAY, W.; ORSAT, V. Microwave-assisted extraction of flavonoids: A review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 2, p. 409-424, 2012. DOI: 10.1007/s11947-011-0573-z.

SHAHIDI, F.; AMBIGAIPALAN, P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects – A review. **Journal of Functional Foods**, v. 18, p. 820-897, 2015. DOI: 10.1016/j.jff.2015.06.018

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of Instrumental Analysis**. 6. ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2007.

SPARKMAN, O. D.; PENTON, Z. E.; KITSON, F. G. **Gas Chromatography and Mass Spectrometry**: A Practical Guide. 2. ed. Burlington: Academic Press, 2011.

STUART, B. **Infrared Spectroscopy:** Fundamentals and Applications. Chichester: Wiley, 2004.

VILKHU, K.; MAWSON, R.; SIMONS, L.; BATES, D. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry – A review. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 9, n. 2, p. 161-169, 2008. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.04.014.

WANG, L.; WELLER, C. L. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 6, p. 300-312, 2006. DOI: 10.1016/j.tifs.2005.12.004.

CAPÍTULO 3

MICROFILTRAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO DE FRIGORÍFICOS DE AVES E SUÍNOS: AVALIAÇÃO DO FLUXO PERMEADO E DA MORFOLOGIA DA MEMBRANA

Euller Eduardo Boff[1], Elisandra Rigo[2], Eduarda Alves Da Fonseca[3], Verônica Baldon Fusinato[4], Clarice Steffens[5], Juliana Steffens[6]

[1]Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI) – 099267@aluno.uricer.edu.br
[2]Profª. Drª. dos Cursos de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química UDESC-Pinhalzinho – elisandra.rigo@udesc.br
[3]Acadêmica do Curso de Engenharia Química (URI) – 103472@aluno.uricer.edu.br
[4] Doutoranda do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (URI) – Erechim-verobaldon@gmail.com
[5]Profª. Drª. dos Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (URI) – Erechim-clarices@uricer.edu.br
[6]Profª. Drª. do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (URI) – Erechim-julisteffens@uricer.edu.br

RESUMO: Os frigoríficos de aves e suínos geram grandes volumes de efluentes com elevada carga orgânica, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias complementares para o tratamento e reúso da água. Este estudo avaliou o desempenho de membranas de microfiltração de 0,1 µm aplicadas ao polimento terciário de efluentes provenientes de lagoas de estabilização de um frigorífico localizado no norte do Rio Grande do Sul. Os ensaios foram realizados em sistema de filtração tangencial, operando sob pressões de 0,5 e 1,0 bar. Foram avaliados os fluxos de permeado ao longo do tempo e a morfologia da superfície das membranas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados mostraram que o aumento da pressão operacional elevou os fluxos iniciais de permeado, porém intensificou os efeitos de polarização por concentração e *fouling*, ocasionando maior declínio da permeabilidade durante a operação. As análises por MEV evidenciaram a formação de

depósitos na superfície da membrana após a filtração, confirmando a ocorrência de colmatação por matéria orgânica e sólidos suspensos. Os resultados demonstram que a microfiltração apresenta potencial para o polimento de efluentes agroindustriais e para aplicações de reúso não potável, contribuindo para a sustentabilidade dos recursos hídricos.
Palavras-chave: Reúso de água. *Fouling*. Filtração tangencial. Microscopia eletrônica de varredura.

Introdução

Os frigoríficos avícolas e suinícolas demandam expressivos volumes de água potável em operações sequenciais que englobam desde a recepção e escaldagem até a higienização rigorosa das instalações. Estima-se que o processamento de uma única ave consuma, em média, cerca de 27 litros de água, resultando na geração contínua de um efluente líquido caracterizado por uma matriz físico-química altamente complexa e poluidora (Ragasri; Sabumon, 2023; Martins, 2026). Essas águas residuárias contêm altas concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além de frações elevadas de óleos, graxas, nitrogênio total e sólidos suspensos totais (SST). Quando manejados de forma inadequada, esses efluentes podem causar impactos ambientais significativos, incluindo a eutrofização de corpos hídricos, contaminação de solos e riscos associados à disseminação de patógenos (Pereira *et al.*, 2024).

Historicamente, o gerenciamento desses resíduos líquidos baseia-se em sistemas biológicos de lagoas de estabilização dispostas em série. Essa escolha técnica é motivada pelo baixo custo operacional, simplicidade de manutenção e alta capacidade de amortização de cargas de choque orgânico (Del Nery *et al.*, 2013). Contudo, embora os sistemas de lagoas demonstrem eficiência na remoção da carga orgânica carbonácea bruta, eles frequentemente falham em atender aos padrões de lançamento cada vez mais restritivos impostos pelas legislações contemporâneas, como a Lei nº 14.546/2023 e a Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011; Brasil, 2023). Deficiências na retenção de nutrientes solúveis e o arraste crônico de biomassa algal senescente limitam a qualidade do efluente final, inviabilizando estratégias de reúso industrial sem um polimento terciário adequado.

Além das exigências ambientais relacionadas ao lançamento de efluentes, a crescente preocupação com a disponibilidade dos recursos hídricos tem impulsionado a busca por tecnologias capazes de promover o reúso seguro da água em processos industriais. Nesse contexto, o tratamento avançado de efluentes torna-se uma ferramenta estratégica para reduzir a captação de água potável, minimizar custos operacionais e fortalecer práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade. A reutilização de efluentes tratados em atividades que não exigem padrão de potabilidade, como lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes e sistemas de

resfriamento, representa uma alternativa cada vez mais adotada pelas indústrias para aumentar a eficiência no uso da água e reduzir impactos ambientais.

Diversos estudos têm demonstrado a viabilidade da aplicação de Processos de Separação por Membranas (PSM) como etapa de polimento de efluentes previamente submetidos a tratamentos biológicos. Em sistemas compostos por lagoas de estabilização, a utilização de membranas tem se mostrado eficiente na remoção de sólidos suspensos, biomassa algal residual, matéria orgânica e microrganismos remanescentes, promovendo melhorias significativas na qualidade do efluente final. Segundo Fatima *et al.* (2021), a associação entre tratamentos biológicos convencionais e tecnologias de membranas representa uma alternativa promissora para o reúso de água em indústrias agroalimentares. De forma semelhante, Dyosile *et al.* (2021) verificaram que a integração de etapas de filtração por membranas após tratamentos biológicos contribui para a obtenção de efluentes com qualidade compatível para aplicações de reúso não potável.

Nesse cenário, a integração de Processos de Separação por Membranas (PSM), especificamente a microfiltração (MF), tem se consolidado como uma alternativa tecnológica promissora. Atuando como uma barreira física seletiva por exclusão de tamanho, a microfiltração permite a remoção de sólidos coloidais, microalgas e microrganismos patogênicos remanescentes do tratamento biológico (Fatima *et al.*, 2021). O monitoramento do fluxo de permeado, que representa o volume de água purificada que atravessa a área efetiva da membrana por unidade de tempo, constitui um dos principais indicadores do desempenho hidráulico do processo. A obtenção e a manutenção de fluxos elevados favorecem a viabilidade técnica e econômica da tecnologia, especialmente em aplicações voltadas ao reúso de água (Dyosile *et al.*, 2021).

Todavia, a consolidação industrial dessa tecnologia enfrenta o obstáculo do *fouling* (colmatação), manifestado pela deposição de substâncias poliméricas extracelulares, proteínas, matéria orgânica e sólidos suspensos na superfície e nos poros da membrana (Hasan *et al.*, 2024). Esse fenômeno gera aumento progressivo da resistência hidráulica ao escoamento, resultando em declínio contínuo do fluxo de permeado sob pressão transmembrana constante. Consequentemente, ocorre redução da produtividade do sistema e aumento dos custos operacionais associados à limpeza química e à substituição dos módulos filtrantes (Fatima *et al.*, 2021).

Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivo avaliar o desempenho do polimento terciário de efluentes provenientes de lagoas de estabilização de um frigorífico de aves e suínos por meio da aplicação de membranas de microfiltração, visando ao reúso industrial da água tratada. A investigação concentrou-se na análise do comportamento do fluxo de permeado ao longo do tempo operacional, bem como na caracterização morfológica da superfície da membrana por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), buscando compreender os mecanismos de colmatação associados ao tratamento desse tipo de efluente agroindustrial.

Metodologia

O efluente utilizado nos experimentos foi proveniente de um frigorífico localizado na região norte do estado do Rio Grande do Sul, cuja atividade contempla o abate e processamento de aves e suínos. O sistema de tratamento da indústria recebe uma corrente mista de águas residuárias geradas em diferentes etapas dos processos produtivos, as quais são encaminhadas para tratamento em lagoas de estabilização. A coleta foi realizada diretamente após a lagoa de estabilização.

As amostras foram coletadas em galões de polipropileno com capacidade de 25 L, previamente higienizados com água e detergente neutro e esterilizados com álcool 70%, a fim de evitar contaminações externas que pudessem interferir nos resultados analíticos. Os recipientes foram devidamente identificados quanto à data, local e pontos de coleta, garantindo a rastreabilidade das amostras. Após a coleta, o efluente foi transportado até as dependências laboratoriais da URI – Erechim. O efluente foi submetido à filtração em papel filtro qualitativo, com gramatura de 80 g/m² (JProlab), para remoção de particulados, e posteriormente acondicionado em recipientes de polietileno de 5 L, também previamente higienizados e esterilizados, e congelado a −18 °C (±1 °C) em freezer (Consul, modelo CVU 30), para posterior utilização.

Para os testes, o efluente foi descongelado à temperatura ambiente (20°C ± 3°C) e homogeneizado manualmente. O sistema utilizado é apresentado na **Erro! Fonte de eferência não encontrada.**.

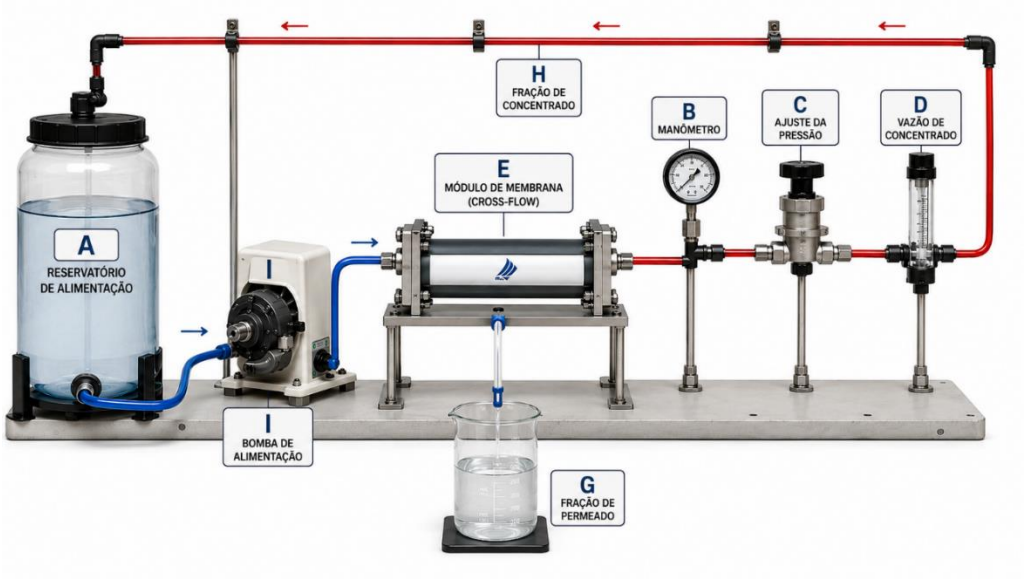
Foram realizados ensaios utilizando membranas planas de microfiltração de 0,1 µm de polifluoreto de vinilideno (PVDF) (*Synder Filtration*) operando nas pressões de 0,5 e 1,0 bar. Antes da utilização, as membranas foram cortadas para encaixe no módulo (Figura 2), com área de 0,0045 m^2, hidratadas por 1 h e 30 min em álcool etílico absoluto P.A., em temperatura ambiente (20°C ± 3°C), conforme recomendação do fabricante.

Posteriormente, as membranas foram inseridas no módulo e compactadas, com água deionizada a 2 bar por 20 min, para redução da porosidade e aumento da densidade do material. O sistema permaneceu em funcionamento por aproximadamente 10 min, visando à estabilização do fluxo de permeado e das variáveis operacionais do processo.

Foram avaliados os fluxos de permeado, coletando-se amostras de permeado em intervalos regulares de 15 min, durante 1 h. O fluxo de permeado é calculado pela razão entre o volume de permeado coletado e o produto da área de permeação pelo tempo de coleta.

Após a finalização de cada ensaio, o sistema foi submetido ao procedimento de limpeza, que consistiu inicialmente na passagem de 2 L de água deionizada sem aplicação de pressão, seguida da recirculação, durante 10 min, de solução de limpeza composta por 1 L de água deionizada e 11 mL de hipoclorito de sódio. Posteriormente, realizou-se novo enxágue com 2 L de água deionizada sem pressão, finalizando-se o procedimento com o esvaziamento completo.

Figura 1. Esquema sistema utilizado para a realização dos testes com membranas. Onde: Alimentação (*A*), manômetro (*B*), ajuste da pressão (*C*), vazão de concentrado (*D*), módulo da membrana plana (E), controlador da bomba de alimentação (*F*), fração de permeado (*G*), fração de concentrado (*H*), bomba de alimentação (*I*)



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI, 2026).

Os fluxos de permeado foram avaliados com água deionizada, com efluente filtrado e com efluente após limpeza do sistema.

Figura 2. Aspecto visual do módulo de membranas



Fonte: Autores, 2026.

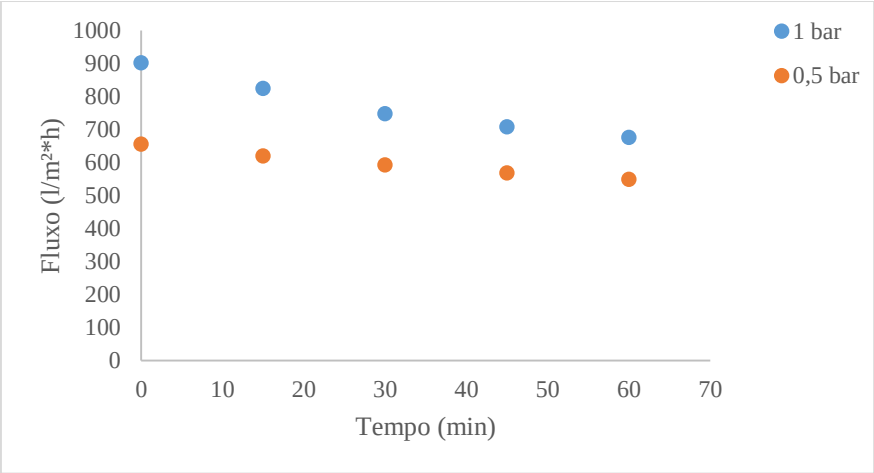
Para a avaliação morfológica da superfície das membranas de microfiltração, utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL, JCM-7000). Amostras das

membranas nas condições virgem/limpa e pós-tratamento com efluente da lagoa de estabilização a 1 bar, foram previamente secas e metalizadas com uma fina camada de ouro e avaliadas com ampliações de 30x e 100x.

Resultados e discussões

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados dos fluxos de permeado de água e de efluente em relação ao tempo, para a membrana de microfiltração de 0,1 µm, para pressões de 0,5 e 1,0 bar.

Figura 3. Fluxo de permeado da água em função do tempo nas pressões de 0,5 e 1,0 bar



Fonte: Autores, 2026

Pode-se verificar na Figura 3 o comportamento hidráulico do sistema na ausência de interferências significativas causadas por matéria orgânica e sólidos suspensos, servindo como referência para comparação com os ensaios realizados com efluente. Observou-se que o aumento da pressão operacional de 0,5 para 1,0 bar promoveu incremento significativo no fluxo de permeado, com fluxo inicial de aproximadamente 656,0 L/m²·h em 0,5 bar e 902,0 L/m²·h em 1,0 bar. Entretanto, em ambas as condições operacionais verificou-se redução gradual do fluxo ao longo do tempo, atingindo valores finais de 549,0 L/m²·h e 676,0 L/m²·h, respectivamente, correspondendo a decaimentos aproximados de 16,3% para 0,5 bar e 25,0% para 1,0 bar.

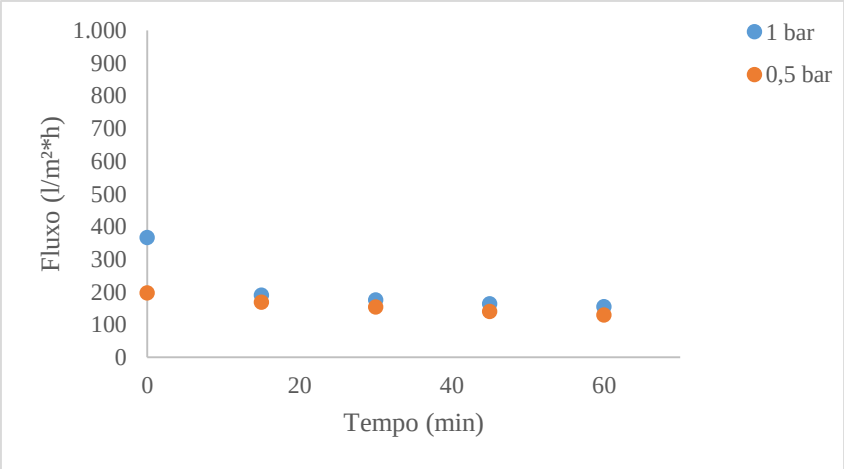
Como a água deionizada apresenta baixa concentração de contaminantes, a diminuição observada no fluxo não pode ser atribuída à formação de *fouling* significativo, estando relacionada predominantemente à compactação da membrana e ao rearranjo estrutural do material polimérico durante a operação. Além disso, constatou-se que o declínio do fluxo foi mais acentuado nos instantes iniciais do

ensaio, seguido de tendência à estabilização, comportamento característico de sistemas de filtração tangencial.

Na Figura 4, verifica-se uma redução do fluxo de permeado em comparação aos ensaios com água deionizada (Figura 3), evidenciando a influência da presença de sólidos suspensos, matéria orgânica e demais contaminantes sobre o desempenho do processo de filtração. Na pressão operacional de 0,5 bar, o fluxo de permeado inicial foi de aproximadamente 196,80 L/m²·h, reduzindo para 129,30 L/m²·h ao final de 60 min de operação, correspondendo a um decaimento aproximado de 34,3%. Já na condição de 1,0 bar, observou-se fluxo inicial de 366,30 L/m²·h, com redução para 154,70 L/m²·h ao término do ensaio, representando decaimento de aproximadamente 57,8%.

O aumento da pressão operacional promoveu elevação do fluxo inicial, demonstrando a influência direta da pressão transmembrana sobre a permeação através da membrana. Entretanto, verificou-se acentuado declínio do fluxo ao longo do tempo, especialmente nos instantes iniciais do processo, comportamento associado principalmente à formação de uma camada de polarização por concentração e ao fenômeno de *fouling* sobre a superfície e nos poros da membrana. Além disso, observou-se tendência de estabilização do fluxo de permeado ao longo da operação, indicando o estabelecimento gradual de uma resistência adicional relativamente constante ao transporte de massa.

Figura 4. Fluxo de permeado de efluente em função do tempo nas pressões de 0,5 e 1,0 bar

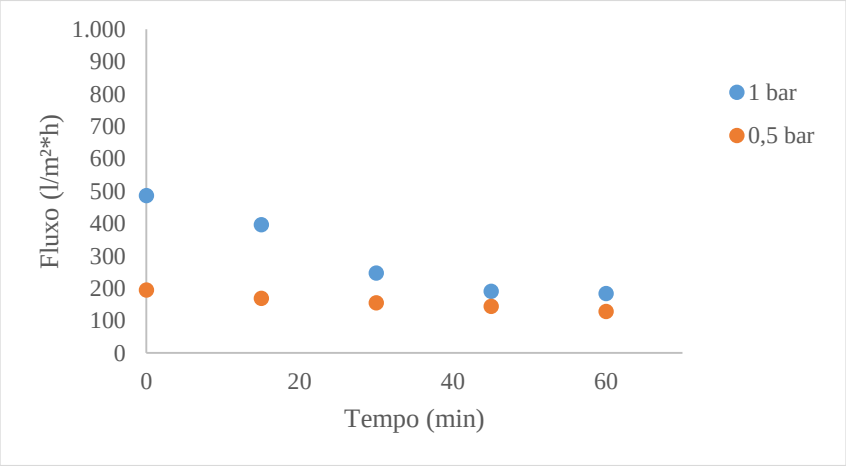


Fonte: Autores, 2026.

A Figura 5 apresenta o fluxo de permeado de efluente em função do tempo, após o processo de limpeza, nas pressões de 0,5 e 1,0 bar. Verifica-se uma recuperação parcial do desempenho hidráulico da membrana, demonstrando a eficiência da etapa

de limpeza na remoção de parte dos contaminantes depositados durante os ensaios anteriores.

Figura 5. Fluxo de permeado de efluente em função do tempo após o processo de limpeza, nas pressões de 0,5 e 1,0 bar



Fonte: Autores, 2026.

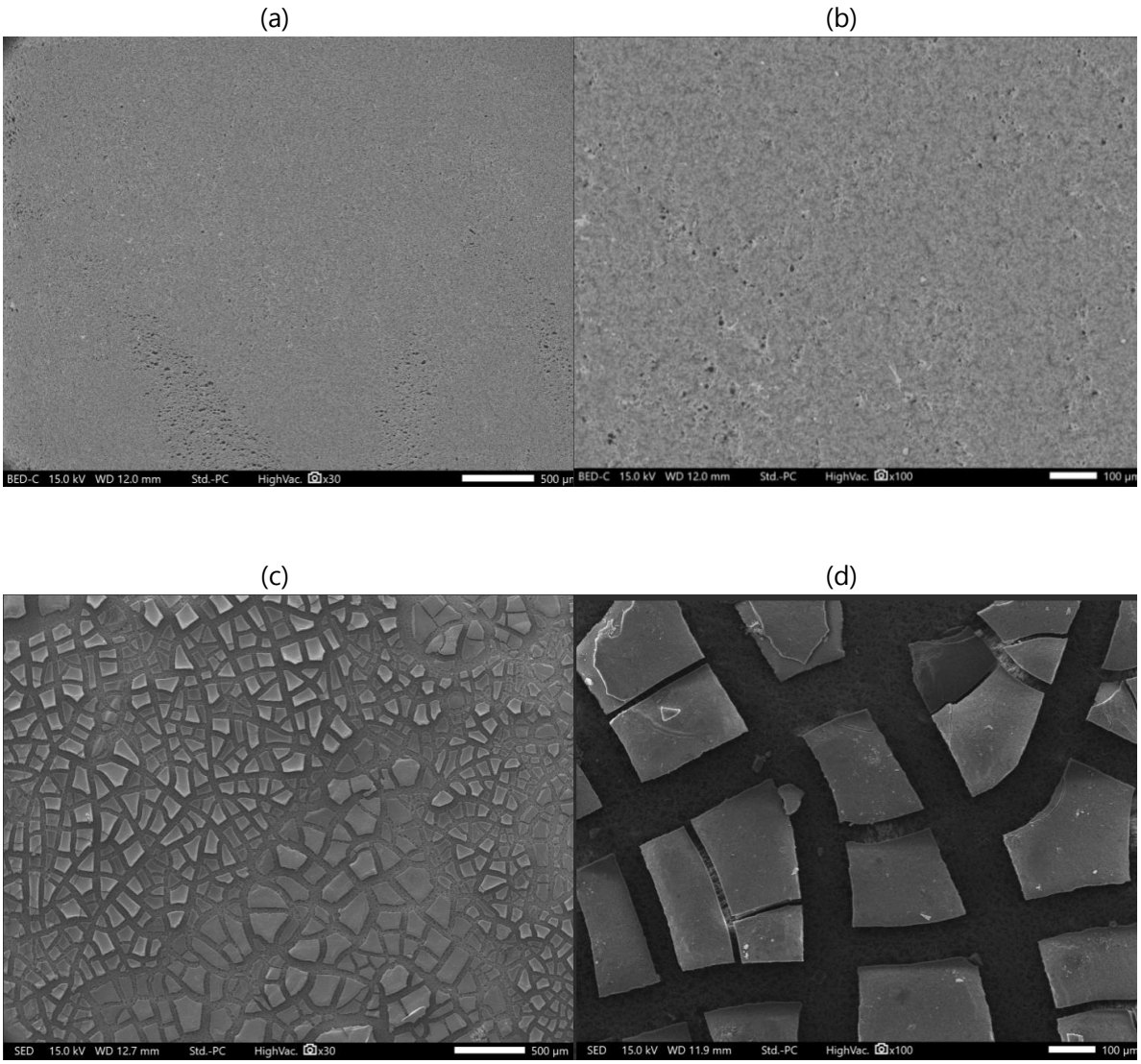
Na pressão operacional de 0,5 bar, o fluxo de permeado inicial foi de aproximadamente 194,24 L/m²·h, reduzindo para 127,76 L/m²·h ao final da operação, correspondendo a um decaimento aproximado de 34,2%. Já na condição de 1,0 bar, observou-se fluxo inicial significativamente superior, de aproximadamente 485,71 L/m²·h, com redução para 183,46 L/m²·h ao término do ensaio, representando decaimento aproximado de 62,2%.

O aumento da pressão operacional promoveu elevação expressiva do fluxo inicial, evidenciando a influência direta da pressão transmembrana sobre o transporte através da membrana. Entretanto, verificou-se redução gradual do fluxo ao longo do tempo em ambas as condições operacionais, comportamento associado principalmente à formação de *fouling* e à deposição de compostos orgânicos e sólidos suspensos presentes no efluente. Comparando-se os resultados com os ensaios anteriores realizados com efluente (Figura 4), observa-se que o procedimento de limpeza foi capaz de recuperar parcialmente a permeabilidade hidráulica da membrana, especialmente na condição de 1,0 bar, indicando remoção parcial das incrustações formadas durante o processo de filtração. Além disso, observou-se tendência de estabilização do fluxo de permeado ao longo da operação.

A Figura 6 apresenta os resultados da morfologia da membrana de microfiltração de 0,1 µm limpa e após uso. As micrografias da membrana limpa (Figuras 6a e 6b) mostram uma superfície homogênea e uniforme, sem a presença de depósitos

ou irregularidades significativas, característica esperada para membranas em condição inicial de operação.

Figura 6. Morfologia da membrana de microfiltração de 0,1 µm limpa (a e b) e após uso (c e d) com ampliações de 30× e 100×



Fonte: Autores, 2026.

Após a utilização no tratamento do efluente proveniente da lagoa de estabilização, observaram-se alterações expressivas na morfologia superficial da membrana (Figuras 6c e 6d). As imagens revelam a presença de material depositado sobre a superfície, formando uma camada heterogênea associada ao acúmulo de matéria orgânica, sólidos suspensos, coloides e outros constituintes presentes no efluente. A formação dessa camada é indicativa da ocorrência de *fouling*, considerado um dos principais fatores limitantes nos processos de separação por membranas.

Os resultados observados por MEV corroboram o comportamento hidráulico apresentado nas curvas de fluxo de permeado. Durante a operação verificou-se redução progressiva do fluxo, especialmente nas condições de maior pressão transmembrana, comportamento que pode ser atribuído à deposição gradual de partículas sobre a superfície da membrana e ao bloqueio parcial de seus poros. De acordo com Hasan *et al.* (2024), efluentes agroindustriais submetidos a tratamentos biológicos apresentam elevada concentração de substâncias poliméricas extracelulares, proteínas e matéria orgânica dissolvida, compostos que favorecem a formação de camadas de incrustação e aumentam a resistência à transferência de massa.

Além da deposição superficial, as imagens sugerem a ocorrência de mecanismos simultâneos de colmatação, incluindo bloqueio de poros e formação de camada de torta. Esses mecanismos contribuem para o aumento da resistência hidráulica total do sistema, resultando no declínio do fluxo de permeado ao longo do tempo. Fenômeno semelhante foi relatado por Fatima *et al.* (2021), que observaram intensa deposição de matéria orgânica em membranas utilizadas no tratamento de efluentes de abatedouros avícolas, ocasionando redução significativa da permeabilidade hidráulica.

A diferença visual entre as superfícies limpa e utilizada demonstra que o efluente tratado apresenta potencial elevado para promover incrustações, mesmo após a etapa biológica em lagoas de estabilização. Tal comportamento evidencia que, embora esses sistemas sejam eficientes na redução da carga orgânica global, ainda permanecem partículas finas, biomassa residual e compostos orgânicos capazes de interagir com a superfície da membrana. Dessa forma, os resultados obtidos por MEV confirmam que o *fouling* foi um dos principais responsáveis pela redução do desempenho hidráulico observada durante os ensaios de microfiltração, ressaltando a importância da adoção de estratégias de limpeza periódica e de otimização das condições operacionais para aumentar a vida útil das membranas e garantir a viabilidade do processo em aplicações de reúso de água.

Conclusão

O presente trabalho avaliou a aplicação da microfiltração como etapa de polimento terciário de efluentes provenientes de lagoas de estabilização de um frigorífico de aves e suínos, com foco no desempenho hidráulico da membrana e na caracterização morfológica de sua superfície. Os resultados demonstraram que a tecnologia apresenta potencial para o tratamento complementar desse tipo de efluente, contribuindo para a melhoria da qualidade da água e ampliando as possibilidades de reúso não potável.

A avaliação dos fluxos de permeado demonstrou que o aumento da pressão transmembrana promoveu maiores fluxos iniciais, porém intensificou os efeitos de polarização por concentração e *fouling*, resultando em maior declínio da permeabilidade ao longo do tempo de operação. Além disso, observou-se que os

procedimentos de limpeza empregados possibilitaram a recuperação parcial do desempenho hidráulico da membrana, demonstrando a importância das etapas de manutenção para a continuidade operacional do sistema.

As análises morfológicas por Microscopia Eletrônica de Varredura confirmaram a deposição de material sobre a superfície da membrana após a filtração, evidenciando a ocorrência de colmatação associada ao acúmulo de matéria orgânica, sólidos suspensos e demais constituintes presentes no efluente. Esses resultados corroboram o comportamento observado nas curvas de fluxo de permeado, indicando que o *fouling* foi um dos principais fatores responsáveis pela redução do desempenho do processo.

Assim, conclui-se que a microfiltração constitui uma alternativa tecnicamente viável para o polimento de efluentes de frigoríficos de aves e suínos tratados em lagoas de estabilização, apresentando potencial para aplicações de reúso não potável e contribuindo para a redução do consumo de água e para a sustentabilidade dos recursos hídricos. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a avaliação de diferentes condições operacionais e estratégias de mitigação do *fouling*, visando ao aumento da eficiência e da vida útil dos sistemas de tratamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC) pela infraestrutura para as análises de MEV e à URI Erechim pelo suporte ao desenvolvimento das atividades experimentais. Também agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo projeto 01.23.0191.00 e à FAPERGS/SICT, Processo PROA: 23/2500-0000841-3 pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRASIL. Lei nº 14.546, de 4 de abril de 2023. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para estabelecer medidas de prevenção a desperdícios, de aproveitamento das águas de chuva e de reúso não potável das águas cinzas. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 5 abr. 2023.

DEL NERY, V.; DAMIANOVIC, M. H. Z.; POZZI, E.; DE NARDI, I. R.; CALDAS, V. E. A.; PIRES, E. C. Long-term performance and operational strategies of a poultry slaughterhouse waste stabilization pond system in a tropical climate. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 71, p. 7-14, 2013. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.006

DYOSILE, P. A.; MDLADLA, C.; NJOYA, M.; BASITERE, M.; NTVAMPE, S. K. O.; KASKOTE, E. Assessment of an Integrated and Sustainable Multistage System for the Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater. **Membranes**, v. 11, n. 8, p. 612, ago. 2021. https://doi.org/10.3390/membranes11080582

FATIMA, F.; DU, H.; KOMMALAPATI, R. R. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater with Membrane Technologies: A Review. **Water**, v. 13, n. 14, p. 1905, jul. 2021. https://doi.org/10.3390/w13141905

HASAN, H. A.; RAHIM, N. F. M.; ALIAS, J.; AHMAD, J.; SAID, N. S. M.; RAMLI, N. N.; BUHARI, J.; ABDULLAH, S. R. S.; OTHMAN, A. R.; JUSOH, H. H. W.; *et al.* A Review on the Roles of Extracellular Polymeric Substances (EPSs) in Wastewater Treatment: Source, Mechanism Study, Bioproducts, Limitations, and Future **Challenges. Water**, 2024, v. 16, n. 19, p. 2812. https://doi.org/10.3390/w16192812.

MARTINS, C. J. Anaerobic Biorefineries for Slaughterhouse Waste and Wastewater: From Process Fundamentals to Resource Recovery. **ACS Engineering Au**, v. 6, n. 2, p. 1-25, abr. 2026. https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.6c00017

OPENAI. **ChatGPT**. Modelo de linguagem baseado em inteligência artificial. Disponível em: https://chat.openai.com. Acesso em: 02 jun. 2026.

PEREIRA, A. K. S.; TEIXEIRA, K. C.; CAVALLINI, G. A critical review on slaughterhouse wastewater: Treatment methods and reuse possibilities. Case Studies. **Journal of Water Process Engineering**, v. 58, n. 3, p. 104819, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104819

RAGASRI, S.; SABUMON, P. C**.** A critical review on slaughterhouse waste management and framing sustainable practices in managing slaughterhouse waste in India. **Journal of Environmental Management**, v. 327, p. 116823, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116823.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE EFICIÊNCIA DA ELETROCOAGULAÇÃO NA REMOÇÃO DE CROMO TRIVALENTE (Cr3+) DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Kelvin Vargas Franco[1], Rogério Marcos Dallago[2], Natalia Paroul[3]

[1]Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI) – k3lvinvargas@gmail.com
[2]Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química (URI) – dallago@uricer.edu.br
[3]Profª. Drª. do Curso de Engenharia Química (URI) – parou@uricer.edu.br

RESUMO: O setor de galvanoplastia vem substituindo progressivamente o cromo hexavalente (Cr(VI)) pelo cromo trivalente (Cr(III)) em razão das restrições ambientais associadas ao primeiro. Entretanto, a presença de agentes complexantes utilizados nos banhos de cromagem dificulta o tratamento dos efluentes gerados, reduzindo a eficiência dos processos convencionais de remoção de metais. Neste contexto, o presente trabalho avaliou a viabilidade técnica e a eficiência de um sistema de eletrocoagulação assistido por peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para a remoção de Cr^{3+} de efluentes provenientes de uma indústria metalmecânica localizada em Erechim/RS. Os ensaios foram realizados em reator de bancada com volume útil de 1 L, equipado com três ânodos de ferro e três cátodos de alumínio, operando sob corrente elétrica constante de 9,7 A. Inicialmente, o efluente oriundo do arraste das peças cromadas contendo 217,7 $mg.L^{-1}$ de cromo foi submetido à eletrocoagulação sem adição de oxidante, alcançando uma eficiência máxima de aproximadamente 67% após 20 min de tratamento. A adição de 10 mL de H_2O_2 50% elevou a eficiência de remoção para 99,7% após 30 min de reação, indicando efeito positivo do oxidante sobre o processo de tratamento. Para o efluente proveniente das águas de enxágue, com concentração inicial de 18,64 $mg.L^{-1}$ de cromo, o tratamento por eletrocoagulação proporcionou remoção de 99,95% em apenas 10 min, resultando em concentrações residuais inferiores a 0,01 $mg.L^{-1}$. Os ensaios conduzidos em um protótipo industrial com capacidade de 1.000 L evidenciaram limitações associadas ao aumento de escala, sendo obtida eficiência máxima de 68,8% após 18 horas de tratamento, com

concentração residual de 3,2 mg.L^{-1} de cromo. O desempenho inferior observado na escala industrial foi atribuído às limitações geométricas da célula eletrolítica, ao maior espaçamento entre os eletrodos e às restrições de transferência de massa e carga elétrica no sistema ampliado. Os resultados demonstram que a eletrocoagulação assistida por H_2O_2 apresenta elevado potencial para o tratamento de efluentes contendo Cr(III), embora sua aplicação industrial dependa da otimização do projeto do reator e das condições operacionais.

Palavras-chave: Eletrocoagulação. Cromo trivalente. Agentes complexantes. Tratamento de efluentes. Aplicação de escala.

Introdução

A indústria metalmecânica constitui um dos principais setores responsáveis pelo desenvolvimento tecnológico e econômico global, sendo a galvanoplastia uma etapa fundamental para a agregação de valor aos produtos metálicos. Dentre os processos galvânicos, a cromagem destaca-se por proporcionar propriedades importantes aos materiais, como elevada resistência à corrosão, maior dureza superficial e acabamento estético de alta qualidade.

Historicamente, os processos de cromagem basearam-se na utilização de cromo hexavalente (Cr(VI)) (Kushner, 2020). Entretanto, devido à elevada toxicidade, ao caráter carcinogênico e às rigorosas restrições ambientais impostas por legislações internacionais, o uso desse composto vem sendo progressivamente limitado. Nesse contexto, o cromo trivalente (Cr(III)) passou a ser adotado como alternativa tecnologicamente viável e ambientalmente mais segura, em conformidade com os princípios da química verde (Altmayer, 2018).

Apesar das vantagens ambientais associadas ao uso de Cr (III), sua aplicação introduziu novos desafios técnicos aos processos galvânicos. Em solução aquosa, o íon Cr^{3+} apresenta elevada estabilidade química devido à formação de complexos coordenados, principalmente na forma hexaaquocromo ($[Cr(H_2O)_6]^{3+}$), o que reduz a cinética de deposição metálica sobre a superfície das peças. Para contornar essa limitação, os banhos galvânicos utilizam agentes complexantes e quelantes, como carboxilatos, citratos e aminoácidos, cuja função é estabilizar o banho eletrolítico, evitar a precipitação do cromo na forma de hidróxido e favorecer a transferência eletrônica na interface eletrodo/solução, permitindo a obtenção de depósitos metálicos homogêneos, aderentes e com elevado brilho superficial (Protsenko, 2016).

Embora indispensáveis para a estabilidade operacional do banho galvânico, esses compostos complexantes dificultam significativamente o tratamento dos efluentes industriais. A elevada estabilidade termodinâmica dos complexos formados mantém o Cr^{3+} solubilizado, reduzindo a eficiência de métodos convencionais de remoção, especialmente os processos baseados em precipitação alcalina. Como

consequência, frequentemente observam-se concentrações residuais de cromo acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira. De acordo com a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011**,** o valor máximo permitido para lançamento de cromo trivalente (Cr^{3+}) é de 1,0 $mg \cdot L^{-1}$**,** enquanto para cromo hexavalente (Cr^{6+}) é de 0,1 $mg \cdot L^{-1}$, tornando indispensável a aplicação de tecnologias eficientes para o tratamento desses efluentes antes do descarte no meio ambiente.

Na tentativa de superar essa limitação, o uso de coagulantes convencionais, como o cloreto férrico ($FeCl_3$), tem sido empregado no tratamento dos efluentes. Contudo, apesar da eficiência satisfatória na remoção do metal, essa prática pode ocasionar problemas operacionais relevantes vinculados a formação de aglomerados cristalinos e precipitados ricos em ferro (Deneux-Mustin *et al.*, 2001).

Na empresa avaliada neste estudo, o tratamento dos efluentes provenientes do processo de cromagem é realizado por coagulação química, utilizando cloreto férrico ($FeCl_3$) como coagulante primário. Após a dosagem do reagente, o efluente permanece sob aeração por aproximadamente 30 minutos, favorecendo a coagulação e a oxidação de espécies presentes. Em seguida, realiza-se a adição de cal hidratada, para ajuste do pH e precipitação dos metais, e de polímero floculante, promovendo a formação e a sedimentação dos flocos. Entretanto, durante a operação do sistema, verificou-se intensa formação de incrustações e cristais em tubulações e tanques da estação de tratamento (Figura 1), decorrente da precipitação de compostos inorgânicos, o que eleva os custos de manutenção e reduz a eficiência operacional do processo.

Figura 1. Cristais coletados no sistema de tratamento de efluentes



Fonte: Autores, 2026.

Adicionalmente, a substituição do $FeCl_3$ por outros coagulantes, como policloreto de alumínio e tanino, não proporcionou resultados satisfatórios, principalmente em relação à concentração residual de cromo no efluente tratado,

reforçando que a eficiência do tratamento depende tanto do tipo de reagente quanto das características específicas do efluente tratado (Sartor *et al.*, 2019, Straioto *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, torna-se necessária a busca por alternativas tecnológicas capazes de promover a degradação dos complexos de Cr(III) de forma eficiente e ambientalmente segura. A literatura relata o emprego de agentes oxidantes, como hipoclorito de sódio (NaOCl), ozônio (O_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), para a degradação dos quelantes e consequente liberação do metal para precipitação (Di Bernardo, 2017). Entretanto, essa etapa requer rigoroso controle operacional, uma vez que condições inadequadas podem favorecer a oxidação do Cr (III) para Cr (VI), espécie significativamente mais tóxica e ambientalmente restrita. Estudos indicam que essa conversão é favorecida em meios alcalinos, tornando o controle de pH um parâmetro crítico durante o tratamento.

Nesse contexto, a eletrocoagulação associada ao peróxido de hidrogênio apresenta-se como uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes contendo Cr (III). A utilização de ânodos de ferro possibilita a geração *in situ* de espécies coagulantes, reduzindo a necessidade de adição de reagentes químicos e evitando o aumento da salinidade do meio por íons cloreto (Martínez-Huitle; Brillas, 2019). Paralelamente, a adição controlada de H_2O_2 pode favorecer a degradação parcial dos agentes complexantes presentes no efluente, aumentando a disponibilidade do cromo para posterior remoção por coagulação e precipitação.

A eficiência do processo depende diretamente das condições operacionais empregadas, especialmente do pH do meio, que influencia tanto as reações de degradação dos complexos quanto os mecanismos de coagulação, precipitação e separação física. Assim, o presente trabalho propõe avaliar a viabilidade técnica de um sistema de eletrocoagulação assistido por peróxido de hidrogênio aplicado ao tratamento de efluentes industriais de cromagem contendo íons Cr (III).

Metodologia

As etapas do estudo realizado estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma da metodologia experimental do estudo



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT, 2026).

Coleta e caracterização do efluente

As amostras de efluente foram coletadas em uma indústria metalúrgica localizada na região de Erechim/RS, proveniente do processo de cromagem contendo cromo trivalente (Cr^{3+}). Foram avaliados dois tipos de efluentes: (i) o efluente concentrado proveniente do arraste das peças cromadas, contendo aproximadamente 200 $mg.L^{-1}$ de cromo, e (ii) o efluente proveniente das águas de enxágue do processo, contendo entre 15 e 20 $mg.L^{-1}$ de cromo.

Antes da realização dos ensaios de tratamento, as amostras foram caracterizadas quanto ao pH e à concentração de cromo total. O pH foi determinado por potenciometria, utilizando um pHmetro digital previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0, 7,0 e 10,0. A concentração de cromo total foi determinada por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)**,** conforme os métodos SMWW 3030 K (digestão de amostras) e SMWW 3120 B, sendo as análises realizadas por laboratório terceirizado especializado. O método apresentou limite de quantificação (LQ) de 0,001 $mg \cdot L^{-1}$**.**

Os ensaios de eletrocoagulação foram realizados em reator de bancada equipado com eletrodos metálicos imersos no efluente, conectados a uma fonte de alimentação de corrente contínua regulável (DC Power Supply**,** modelo FA-1030, faixa de operação de até 30 V e 10 A). A fonte foi utilizada para fornecer a diferença de potencial necessária ao processo eletroquímico, permitindo o ajuste da tensão e da corrente conforme as condições experimentais estabelecidas. Durante os ensaios, os valores de tensão e corrente foram monitorados continuamente pelos visores digitais da própria fonte, garantindo a estabilidade das condições operacionais.

Sistema experimental de eletrocoagulação

Os ensaios experimentais foram conduzidos em bancada laboratorial utilizando um reator eletroquímico com capacidade de 1 L. O sistema foi composto por seis eletrodos metálicos planos dispostos paralelamente e de forma alternada, sendo três chapas de ferro utilizadas como ânodos sacrificiais e três chapas de alumínio utilizadas como cátodos (Figura 3).

Figura 3. Sistema experimental de eletrocoagulação utilizado nos ensaios em bancada. (A) Eletrodos de ferro utilizados como ânodos sacrificiais; (B) Eletrodos de alumínio utilizados como cátodos; (C) Célula eletrolítica; (D) Protótipo escala laboratorial completamente montado para a realização dos ensaios



(A) (B) (C) (D)

Fonte: Autores, 2026.

Procedimento experimental

Os ensaios de eletrocoagulação em bancada foram realizados com 1 litro de efluente, a temperatura ambiente empregando uma corrente (I) de 9,7 amperes (A), empregando uma fonte de corrente continua (Fonte de alimentação Modelo FA – 3050, Marca: *Instrutherm*). Foram realizados ensaios sem e com a presença de peróxido de hidrogênio na concentração de 50%. As amostras foram coletadas nos tempos de 0, 10, 20, 30 e 50 minutos para determinação da concentração residual de cromo, para cada batelada. Para os ensaios com peróxido optou-se por realizar os ensaios com um tempo pré-determinado com base nos resultados obtidos sem o peróxido.

Durante o processo eletroquímico, ocorre a dissolução anódica do ferro, promovendo a geração *in situ* de espécies coagulantes no meio reacional. Os hidróxidos de ferro formados atuaram como agentes adsorventes e coagulantes, favorecendo a agregação das partículas contaminantes e a remoção do cromo presente no efluente. Nos cátodos de alumínio ocorreu a redução da água, promovendo a formação de gás hidrogênio e íons hidroxila, contribuindo para os mecanismos de flotação. A adição de H_2O_2 teve como objetivo auxiliar na degradação dos agentes complexantes presentes no efluente, melhorando a disponibilidade dos íons Cr^{3+} em solução, favorecendo sua precipitação do na forma de $Cr(OH)_3$ e, consequentemente sua remoção. As amostras de efluente foram coletadas em uma indústria metalúrgica localizada na região de Erechim/RS, proveniente do processo de cromagem contendo cromo trivalente (Cr^{3+}). Foram avaliados dois tipos de efluentes: (i) o efluente proveniente do arraste das peças cromadas, contendo aproximadamente 200 $mg.L^{-1}$ de cromo, e (ii) o efluente proveniente das águas de enxágue do processo, contendo entre 15 e 20 $mg.L^{-1}$ de cromo.

Monitoramento analítico

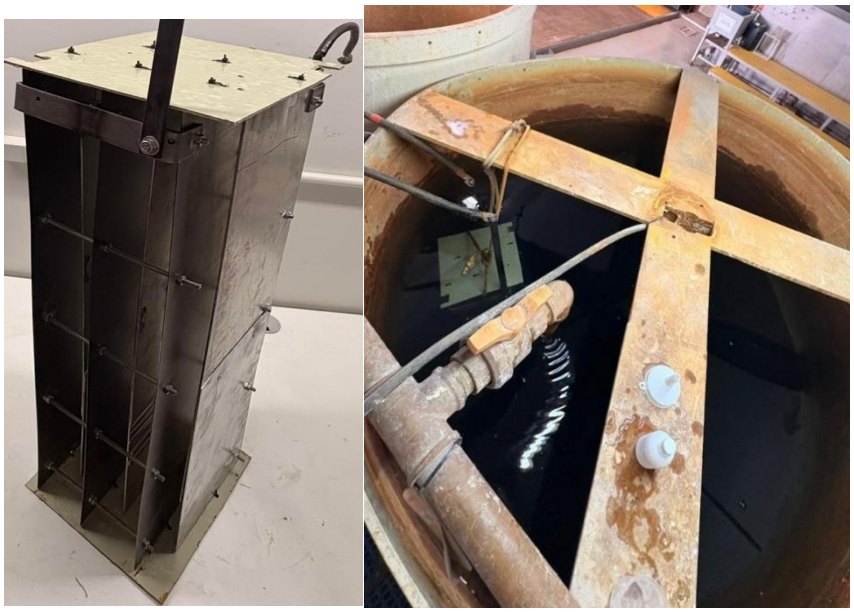
Ao longo dos ensaios experimentais, o pH e a concentração de cromo total foram determinados no início, em intervalos previamente estabelecidos durante o

processo e ao final de cada experimento, permitindo acompanhar a evolução do tratamento eletroquímico. Paralelamente, foram realizadas observações visuais quanto à formação de flocos, às alterações na coloração do efluente e à separação das fases sólido-líquido. O desempenho do sistema foi avaliado com base na eficiência de remoção de cromo e na estabilidade operacional do processo de eletrocoagulação.

Avaliação da Aplicação Industrial

Com base nos resultados obtidos em escala laboratorial, realizou-se uma análise preliminar visando ao dimensionamento do sistema para aplicação industrial. Essa etapa considerou os parâmetros operacionais que apresentaram maior eficiência na remoção de Cr^{3+} durante os ensaios experimentais. O protótipo em escala industrial apresenta um volume útil de trabalho de 1.000 litros e uma célula eletrolítica constituída de seis (6) eletrodos de 80 x 20 cm, três (3) de ferro, empregados como anodos, e três de alumínio, correspondente ao cátodo, intercalados por uma distância de 5 cm (Figura 4).

Figura 4. Célula eletrolítica e unidade industrial com a célula eletrolítica submersa ao efluente



Fonte: Autores, 2026.

Avaliação em escala piloto

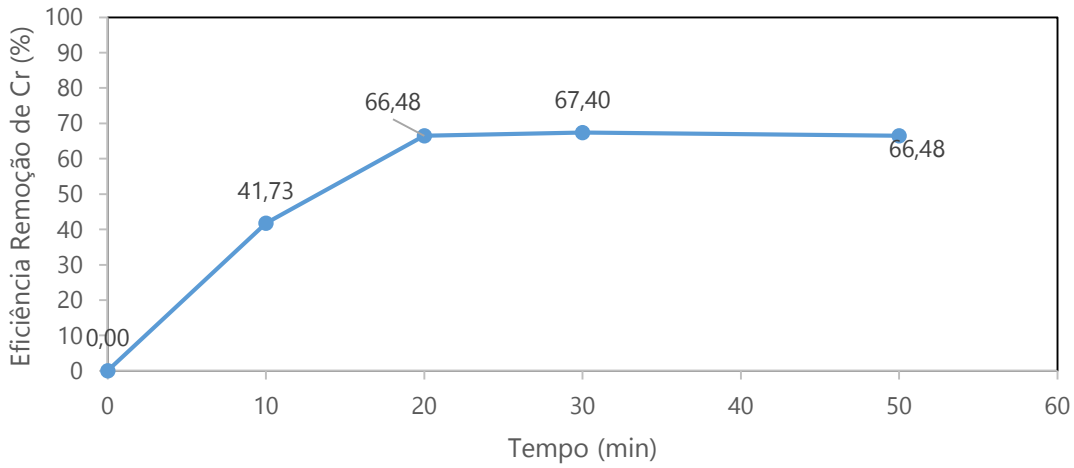
A avaliação em escala industrial foi conduzida empregando o efluente correspondente aos banhos de enxague, sob vazão constante de água, correspondendo ao maior volume de efluente gerado na etapa de cromagem, o qual corresponde a menor contaminação com cromo residual.

Resultados e discussão

Os ensaios preliminares foram conduzidos com 1 litros de efluente, a temperatura ambiente, empregando uma corrente de 9,7A. Primeiramente foi avaliado o efluente gerado em menor volume e com maior teor de Cromo presente, o qual apresenta um pH de 6,0 e um teor de Cromo total de 217,7 $mg.L^{-1}$

A eficiência de remoção de Cr do efluente em função do tempo submetido a eletrocoagulação na ausência de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é apresentada na Figura 5.

Figura 5. Evolução da eficiência da remoção e Cr como tempo de eletrocoagulação



Fonte: Autores, 2026.

Observa-se um aumento da eficiência de remoção e Cr com o tempo até aproximadamente 20 minutos, com uma remoção de ≈ 66-67% do cromo presente, mantendo neste patamar até o final do ensaio, ou seja, 50 minutos reacionais. O aumento do tempo de eletrólise proporciona a geração de maior quantidade de material coagulado e decantado (Figura 6) conduzindo, concomitantemente a remoção do Cr, a uma melhora no aspecto visual do efluente tratado, com uma expressiva remoção visual de cor e turbidez do efluente após 50 minutos de eletrocoagulação (Figura 6).

Figura 6. Efluente tratado por eletrocoagulação em função do tempo reacional



10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos

Fonte: Autores, 2026.

A melhora na eficiência da eletrocoagulação foi vinculada ao aumento da lixiviação de íons Férricos (Fe^{3+}) do anodo para o meio reacional, os quais ao hidrolisarem a água conduzem a geração de hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$) no meio reacional, responsáveis pela coagulação.

Segundo Mollah *et al.*, (2001), os hidróxidos formados apresentam importante função nos sistemas de tratamento, atuando como agentes coagulantes e adsorventes, favorecendo a agregação das partículas contaminantes e auxiliando na remoção do cromo presente no efluente. A formação desses compostos é considerada um dos principais mecanismos responsáveis pela eficiência da eletrocoagulação em sistemas contendo metais pesados.

A remoção de Cr observada, de ≈ 67%, foi considerada pouco eficiente, considerando que o efluente tratado apresentava um pH final alcalino (pH ≈ 9,0), favorável a remoção química de íons Cr^{3+} em meio aquoso na forma de hidróxido de cromo, uma base que apresenta baixa solubilidade em meios aquosos com pHs entre 8 e 10 (Atkins *et al.*, 2013; Vogel *et al.*, 1980).

Esta baixa eficiência de remoção do cromo foi vinculada a composição química do banho e, consequentemente, do efluente, a qual contem agentes quelantes/complexantes empregados com o objetivo de manter o Cr complexado para favorecer sua deposição eletrolítica na etapa de cromagem. Na forma complexada, inerente a sua aplicação industrial, devido a elevada estabilidade química do complexo, a reatividade química dos íons Cr^{3+} ao meio alcalino é inibida, desfavorecendo a formação de hidróxido de cromo III ($Cr(OH)_3$) insolúvel e, consequentemente, influenciando negativamente na sua remoção como um precipitado decantado, na forma livre ou agregado aos coágulos gerados na etapa de coagulação.

Visando melhorar a eficiência do processo de tratamento avaliou-se de forma associativa o emprego de um processo oxidativo, o qual, mediante ruptura dos complexos de Cr, deve proporcionar a libração do cromo em sua forma iônica ($Cr^{3+}_{(aq)}$), favorecendo sua remoção química mediante alcalinização.

Neste sentido foram conduzidos novos ensaios de eletrocoagulação na presença de diferentes volumes de peróxido a 50%. Com base nos resultados obtidos na ausência de peróxido (Figura 4), o tempo reacional de eletrocoagulação foi fixado em 30 minutos, ou seja, em um patamar de estabilidade em relação a remoção obtida. Os resultados obtidos para a remoção de Cr são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Condições experimentais e eficiência de remoção de cromo obtido para os ensaios de eletrocoagulação conduzidos na presença de diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio

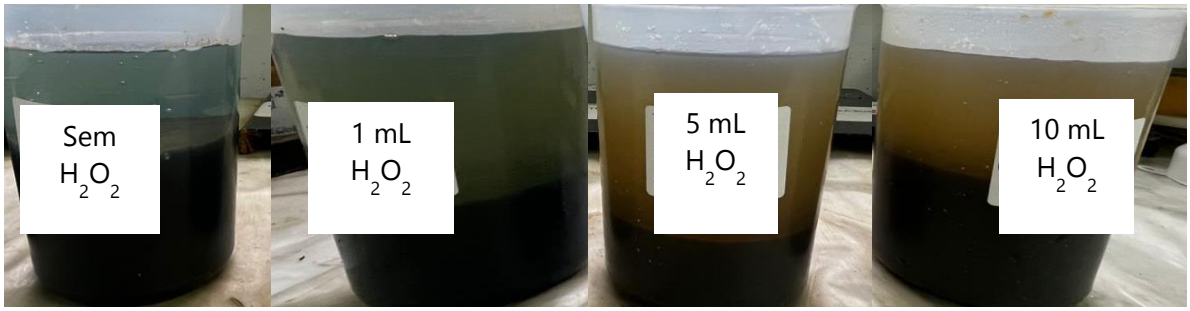
Volume de H_2O_2 50% (mL)	Eficiência de Remoção (%)	pH
0	67,40	9,2
1	68,01	9,1
5	82,18	9,0
10	99,70	9,0

A adição de peróxido promoveu uma melhora na eficiência de remoção de cromo, a qual variou proporcionalmente a concentração de peróxido empregada, passando de 67,4 % sem peróxido para 99,7% com 10 mL de peróxido de hidrogênio adicionados.

Estes resultados indicam que o peróxido, como agente oxidante, está atuando na degradação do agente complexante, a qual se intensifica pelo aumento da concentração, proporcionando a liberação dos íons Cr^{3+} para a solução, que devido ao pH alcalino (pH ≈ 9,0), conduz a sua precipitação como hidróxido de cromo III, o qual se agrega aos coágulos, sendo arrastado para o lodo que é removido por decantação/filtração.

Em relação ao aspecto visual, a adição do peróxido interferiu negativamente quando comparado ao ensaio conduzido sem peróxido, apresentando cor e turbidez mais visíveis, cujas intensidades variaram proporcionalmente com a concentração de peróxido no meio reacional (Figura 7).

Figura 7. Aspecto visual do efluente submetido a diferentes tratamentos por eletrocoagulação seguido de peróxido: sem H_2O_2, 1 mL, 5 mL e 10 mL de H_2O_2



Fonte: Autoes, 2026.

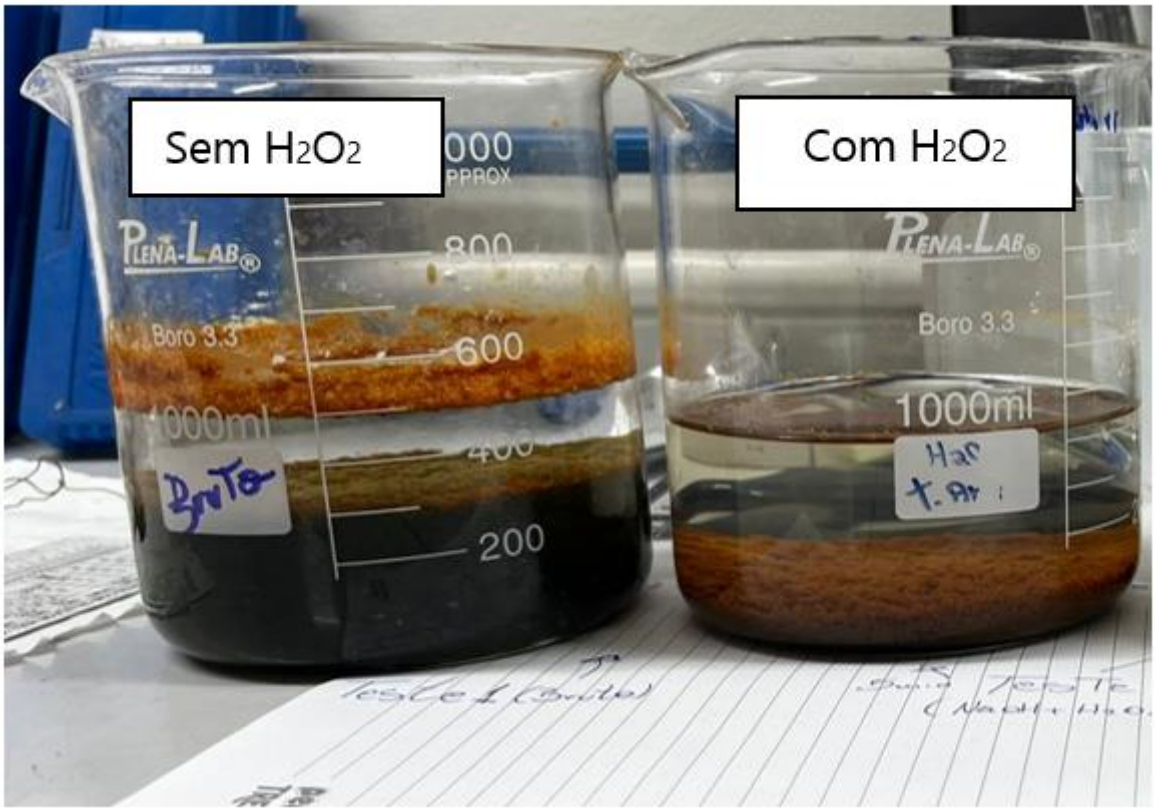
Esta tendência foi vinculada ao caráter oxidante do peróxido sobre o anodo de ferro, favorecendo sua oxidação e, consequentemente, sua lixiviação para o meio reacional, proporcionando maior intensidade de coloração amarelo-laranja característica deste íon em meio aquoso (Harris, *et al.*, 2005, Atkins *et al.*, 2013).

Paralelamente, foram realizados ensaios com o efluente proveniente do sistema de recirculação das águas utilizadas nos três estágios de enxágue das peças cromadas. Esse efluente contém cromo proveniente do arraste do banho de cromagem, apresentando concentração média de aproximadamente 18 $mg \cdot L^{-1}$.

Com este efluente após 10 minutos de eletrocoagulção a remoção de Cr obtida foi de 99,95 %, como efluente tratado apresentando um teor de Cr residual de > 0,01 $mg.L^{-1}$, ou seja, abaixo do exigido pela legislação, que é de 0,1 $mg.L^{-1}$ para Cr(VI) e 1,0 $mg.L^{-1}$, para Cr total (Conama, 2011), indicando que o mesmo atende a legislação vigente para este parâmetro.

A adição de 1 mL de peróxido de hidrogênio 50%, proporcionou, para este mesmo tempo reacional, uma remoção similar, de 99,97%, indicando que para baixas concentrações, o emprego de peróxido seria desnecessário. Visualmente, ambos efluentes tratados apresentaram um aspecto límpido sugerindo a eficiência dos tratamentos (Figura 8).

Figura 8. Aspecto visual do efluentes contendo uma concentração de Cr de 18,64 $mg.L^{-1}$, após 10 minutos de tratamento, sem e com o emprego de 1 mL peróxido no efluente



Fonte: Autores, 2026.

As principais diferenças visuais observadas entre os tratamentos estão relacionadas à coloração do lodo e do efluente tratado. Nos ensaios realizados com adição de peróxido de hidrogênio, verificou-se uma coloração avermelhada mais intensa, atribuída à formação de espécies férricas (Fe^{3+}), favorecida pelo caráter oxidante do peróxido. Embora a adição de peróxido tenha promovido maior eficiência na remoção de cromo, o aumento da coloração indica a permanência de compostos de ferro em suspensão ou dissolvidos, o que pode comprometer o aspecto visual do efluente tratado.

Dessa forma, a aplicação dessa estratégia pode requerer uma etapa complementar de separação sólido-líquido, como decantação, filtração ou clarificação, para adequação da qualidade final do efluente antes do seu lançamento ou reúso.

Ensaios em Escala Industrial

A partir dos dados obtidos nos ensaios em bancada foi conduzido um aumento de escala, com um reator com capacidade para tratar 1 m^3 (1.000 L) de efluente, empregando um sistema de eletrodos com dimensões de 80 x 20 cm (Figura 4). A corrente (I) empregada foi de 9,7 A. O efluente avaliado foi o gerado pelos banhos dos

enxagues, ou seja, o efluente com menor concentração de cromo. O volume de peróxido de hidrogênio 50% empregado nos ensaios foi de 2 $L.m^{-3}$ de efluente. Foram realizados 5 bateladas de tratamento, utilizando diferentes tempos reacionais. As condições experimentais e os resultados obtidos, incluindo a concentração inicial e final de Cr, o tempo de tratamento e a eficiência de remoção, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Eficiência de remoção de cromo de em diferentes tratamentos

Ensaio	Tempo (h)	[Cr] no Efluente ($mg.L^{-1}$)		Eficiência (%)
		Bruto	Tratado	
1	9,5	7,1	3,2	54,8
2	9,2	17,3	7,3	57,5
3	18,0	10,4	3,2	68,8
4	9,1	17,5	9,1	47,8
5	5,0	14,7	11,8	19,6

Observa-se nitidamente um efeito do tempo de tratamento na capacidade de remoção do Cr, com a maior remoção, com 68,8%, sendo observada para o maior tempo, com 18 h reacionais (ensaio 3) e a menor remoção, com 19,6%, para o menor tempo, com 5 h reacionais (ensaio 5).

Independentemente da condição avaliada, a máxima remoção de Cr observada foi de 68,8%. Em relação à concentração de Cr no efluente tratado, o menor teor obtido foi de 3,2 $mg.L^{-1}$, valor superior ao limite estabelecido pela legislação para lançamento em corpos hídricos (CONAMA, 2011), inviabilizando seu descarte direto e indicando a necessidade de tratamentos complementares.

Esta baixa eficiência de remoção observada, entre 19,6 e 68,8%, mesmo com o efluente apresentando uma baixa concentração de Cr, entre 7,1 e 17,5 $mg.L^{-1}$ e estando associado a elevados tempos reacionais, entre 5 e 18 horas, foi vinculada, principalmente, ao dimensionamento da célula eletrolítica, responsável pela geração do agente coagulante, em relação ao volume do reator (Figura 4).

A relação entre a área de contato superficial dos eletrodos do protótipo industrial (9.600 cm^2) e o volume do reator (1 m^3) foi de 9,6 $cm^2.L^{-1}$, ou seja, ≈ 40 vezes inferior a empregada na célula eletrolítica em banca, com uma relação de 420 9,6 $cm^2.L^{-1}$ (3 eletrodos com para superficial de 140 cm^2 para 1 L de efluente).

Outro fator que está contribuindo é o maior espaçamento entre os eletrodos (5 cm), aumentando a resistência elétrica da célula, atuando negativamente na geração dos íons Fe^{3+}, ou seja, do agente coagulante.

A distância entre os eletrodos é uma variável que influência na eficiência do processo de eletrocoagulação, seu distanciamento interfere negativamente no fluxo de elétrons entre os eletrodos e, consequentemente, na dissociação dos íons Fe^{3+} do anodo, responsáveis pela coagulação. O efeito negativo do distanciamento entre os eletrodos poderia ser suprimido pelo aumento da condutividade do meio, o que não foi realizado.

A desproporcionalidade entre a célula eletrolítica e o volume do reator observada na unidade industrial (Figura 4), quando comparada o sistema piloto (Figuras 3) também desfavorece a homogeneização do meio reacional, bem como o contato dos coágulos de hidróxido de ferro (III) com os contaminantes, dificultando sua agregação aos coágulos e, consequentemente, a remoção do cromo.

Como proposta futura, pretende-se manter a célula eletrolítica atual, sendo a mesma acoplada em um reator tubular com dimensões apropriadas a ela, empregando um sistema com recirculação em fluxo continuo, bem como a avaliação do aumento da condutividade mediante a adição de sais ou bases fortes.

Considerações finais

O presente estudo demonstrou que o processo de eletrocoagulação assistido por peróxido de hidrogênio (H_2O_2) apresenta viabilidade técnica e alta eficiência para a remoção de cromo trivalente (Cr^{3+}) em efluentes industriais de galvanoplastia em escala de bancada. Os ensaios laboratoriais revelaram que a presença de agentes complexantes no banho galvânico inibe a precipitação convencional do cromo em meio alcalino, limitando a eficiência da eletrocoagulação pura a aproximadamente 67,4%. Contudo, a inserção associativa de 10 mL de H_2O_2/m^3 atuou eficazmente na oxidação e quebra desses complexos, elevando a eficiência de remoção para 99,7% no efluente concentrado após 30 minutos de reação. Para o efluente proveniente das águas de enxágue, o tratamento de bancada sem peróxido obteve 99,95% de remoção em apenas 10 minutos, reduzindo a concentração residual para valores inferiores a 0,01 $mg.L^{-1}$ (Cr_{VI}) e 1,0 $mg.L^{-1}$ (Cr_{Total}), atendendo com folga as exigências da Resolução CONAMA nº 430/2011.

Por outro lado, os ensaios realizados no protótipo de escala industrial (1.000 L) evidenciaram as complexidades associadas ao *scale-up* do processo. A eficiência máxima observada na planta industrial foi de 68,8% após 18 horas de tratamento, com uma concentração residual mínima de 3,2 $mg.L^{-1}$, valor que ainda excede os limites legais de descarte. Essa redução de desempenho foi correlacionada a limitações físicas de dimensionamento, especificamente o distanciamento excessivo entre os eletrodos (5 cm), que prejudica o fluxo de elétrons e a dissolução do ânodo de ferro, e a desproporção geométrica entre a célula eletrolítica e o volume total do reator, dificultando a homogeneização e o contato dos coágulos com o contaminante.

Embora a tecnologia seja altamente promissora, sua consolidação industrial requer ajustes cinéticos e de engenharia, como a adequação para um reator tubular de

fluxo contínuo com recirculação e a otimização da condutividade do meio, passos fundamentais para viabilizar esta alternativa sustentável na gestão de efluentes metalúrgicos.

REFERÊNCIAS

ALTMAYER, J. P. **Processos de galvanoplastia***:* tecnologia e sustentabilidade. 2. ed. São Paulo: Ed. Técnica, 2018.
ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de química***:* questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 16 maio 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). ***Diário Oficial da União***: seção 1, Brasília, DF, p. 89, 16 maio 2011.

DENEUX-MUSTIN, S. *et al.* Ferric chloride and lime conditioning of activated sludges: an electron microscopic study on resin-embedded samples. **Water Research**, Oxford, v. 35, n. 10, p. 2455-2466, 2001.

DI BERNARDO, L. **Tratamento de efluentes industriais**: processos físico-químicos. Rio de Janeiro: LCTE, 2017.

HARRIS, D. C. **Análise química quantitativa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

KUSHNER, J. B. **Water and waste control for the plating shop**. 3. ed. Cincinnati: Gardner Publications, 2020.

MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; BRILLAS, E. **Electrochemical alternatives for drinking water and wastewater treatment**. New York: Elsevier, 2019.

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L. Electrocoagulation (EC): science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 29-41, 2001.

OPENAI. **ChatGPT**. Modelo de linguagem baseado em inteligência artificial. Disponível em: https://chat.openai.com. Acesso em: 12 jun. 2026.

PROTSENKO, V. S. Electrodeposition of chromium from trivalent chromium baths. In: SCHLESINGER, M.; PAUNOVIC, M. (ed.). **Modern aspects of electrochemistry**. Cham: Springer, 2016. p. 1-58.

SARTOR, V. *et al.* Using vegetable tannin and polyaluminium chloride as coagulants for dairy wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, Amsterdam, v. 31, 2019.

STRAIOTO, I. T. *et al.* Tannin-based coagulants: current development and prospects on synthesis and applications. **Environmental Technology & Innovation**, Amsterdam, v. 28, 2022.

VOGEL, A. I. *et al.* **Vogel's textbook of quantitative inorganic analysis**. 4. ed. London: Longman, 1980.

CAPÍTULO 5

PRÉ-TRATAMENTOS E HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE JATOBÁ (*Hymenaea stigonocarpa*) E PEQUI (*Caryocar brasiliense*) VISANDO À OBTENÇÃO DE AÇÚCARES FERMENTESCÍVEIS

Hernan Felipe Pieta Biavatti[1], Laís Thomazoni[2], Jamile Zeni[3], Eunice Valduga[4]

[1]Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI) – hernanbiavatti@gmail.com
[2]Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEAL) – lais.thomazoni@hotmail.com
[3]Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEAL) e do Curso de Engenharia Química – jamilezeni@uricer.edu.br
[4]Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEAL) e do Curso de Engenharia Química – veunice@uricer.edu.br

RESUMO: O aproveitamento de resíduos lignocelulósicos provenientes de frutos do Cerrado representa uma alternativa para a obtenção de açúcares fermentescíveis e a valorização de subprodutos agroindustriais. Neste estudo, avaliaram-se a casca de pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess.) e a casca e a polpa de jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne) por meio de caracterização granulométrica, condições de pré-tratamentos (hidrotérmico convencional, hidrotérmico modificado, ácido sulfúrico a 2% (v/v) e peróxido de hidrogênio a 4,733% (v/v)), hidrólise enzimática com 222 µL de preparado enzimático comercial de celulase – Celluclast® (atividade de ~700 EGU g^{-1}) e quantificação de açúcares redutores totais (ART) pelo método do ácido 3,5-dinitrossalicílico (DNS). Os diâmetros médios de Sauter foram de 0,264 mm para o jatobá e 0,455 mm para o pequi, respectivamente. Entre as condições avaliadas, o pré-tratamento hidrotérmico convencional (121°C, 1 atm por 15 min), seguido da hidrólise enzimática foi o que proporcionou as maiores concentrações de ART, de 25,77 g 100 g^{-1} para o jatobá e 24,66 g 100 g^{-1} para o pequi, respectivamente. A comparação dos resultados indica que, nas condições estudadas, o tipo de pré-

tratamento e a hidrólise enzimática foram mais determinante, que a granulometria, para a conversão das biomassas lignocelulósicas em açúcares. Os resíduos avaliados constituem fontes promissoras de açúcares fermentescíveis com potencial aplicação em biorrefinarias e na produção de bioetanol.

Palavras-chave: Frutos do Cerrado. Biorrefinaria. Sacarificação. Resíduos agroindustriais. Tratamento hidrotérmico. Celluclast®.

Introdução

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e produtos de base biológica tem impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais. Entre esses resíduos, as biomassas lignocelulósicas destacam-se por sua elevada disponibilidade, baixo custo e potencial para a produção de biocombustíveis, bioenergia e compostos químicos de alto valor agregado (Chandel; Silva, 2012; Mankar *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2025). A utilização desses materiais está alinhada aos princípios da bioeconomia e da economia circular, promovendo a redução de impactos ambientais e a valorização de resíduos provenientes das cadeias produtivas agrícolas.

Entretanto, a estrutura complexa da biomassa lignocelulósica, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, confere elevada recalcitrância ao material, dificultando o acesso das enzimas às fibras celulósicas e reduzindo a eficiência da hidrólise enzimática (Zhao; Zhang; Liu, 2012; Mankar *et al.*, 2021). Dessa forma, a conversão eficiente desses resíduos em açúcares fermentescíveis, depende da aplicação de pré-tratamentos capazes de modificar a estrutura física e química da biomassa, aumentar sua porosidade, reduzir as barreiras impostas pela lignina e ampliar a área superficial disponível para a ação enzimática (Shukla *et al.*, 2023; Basera; Chakraborty; Sharma, 2024).

Diversos métodos de pré-tratamento têm sido empregados com esse objetivo, incluindo processos químicos, físicos e hidrotérmicos. Esses métodos podem promover a solubilização parcial da hemicelulose e alterações na lignina, favorecendo a hidrólise enzimática; contudo, sua eficiência depende das características de cada matéria-prima e das condições operacionais (Rabelo, 2007; Soltanian *et al.*, 2020; Shukla *et al.*, 2023).

No Brasil, frutos nativos do Cerrado, como o jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne) e o pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess.), apresentam potencial para aplicações em biorrefinarias devido à geração de resíduos durante seu processamento. A casca de pequi e a casca e a polpa de jatobá contêm constituintes lignocelulósicos e podem ser empregadas como matérias-primas para a obtenção de açúcares fermentescíveis e, posteriormente, de biocombustíveis e outros bioprodutos (Silva *et al.*, 2018; Broda; Yelle; Serwańska, 2022).

Outro aspecto relevante para o aproveitamento dessas biomassas é a granulometria. Não existe uma faixa granulométrica universalmente ideal, pois a condição mais adequada depende da composição e da rigidez da biomassa, do tipo de reator e do pré-tratamento empregado. Em geral, a redução do tamanho das partículas aumenta a área superficial e pode favorecer a transferência de massa; entretanto, moagem excessiva pode elevar o consumo de energia e provocar compactação do material (Mankar *et al.*, 2021; Basera; Chakraborty; Sharma, 2024). Assim, a caracterização granulométrica deve ser interpretada em conjunto com os resultados de cada processo.

Apesar do potencial dos resíduos de frutos do Cerrado, ainda são escassos os estudos que avaliam comparativamente a resposta da casca de pequi e da biomassa de jatobá a diferentes pré-tratamentos visando à conversão em açúcares redutores. Além disso, a influência das características físicas, como a granulometria, sobre a eficiência da hidrólise enzimática ainda necessita ser melhor compreendida para essas matérias-primas. Dessa forma, a avaliação desses resíduos pode contribuir para ampliar o uso de biomassas regionais em processos de biorrefinaria.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da casca de pequi e da casca e da polpa de jatobá como fontes de biomassa lignocelulósica para a obtenção de açúcares fermentescíveis. Para isso, realizou-se a caracterização granulométrica das matérias-primas, seguida da aplicação dos pré-tratamentos hidrotérmico convencional, hidrotérmico modificado, ácido sulfúrico a 2% (v/v) e peróxido de hidrogênio a 4,733% (v/v), seguido da hidrólise enzimática (Celluclast® 1.5 L) e da quantificação dos ART, com o objetivo de identificar a condição mais eficiente nas condições experimentais avaliadas.

Material e métodos

Coleta e preparo das matérias-primas

As amostras de casca de pequi e de casca e polpa de jatobá, com umidade aproximada de 10%, foram fornecidas já desidratadas e desintegradas pelo Centro de Desenvolvimento Agroecológico do Cerrado, Goiânia, GO. A caracterização granulométrica foi realizada em peneiras (Série *Tyler*) de 12 a 270 mesh para o jatobá e de 12 a 170 mesh para o pequi, conforme as faixas efetivamente apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Para os pré-tratamentos, utilizou-se uma porção representativa da amostra integral, sem seleção de uma faixa granulométrica específica. O diâmetro médio de Sauter (Dps) foi calculado de acordo com McCabe, Smith e Harriott (2005), conforme a Equação 1.

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum\left(\frac{x_i}{d_i}\right)} \quad (1)$$

Onde: *xi* é a fração mássica retida em cada classe e *di* é o diâmetro médio da classe, calculado pela média entre as aberturas superior (D+) e inferior (D-) das peneiras.

Pré-tratamentos

Ácido sulfúrico

O pré-tratamento com ácido súlfurico seguiu a metodologia descrita por De Carli (2011), com adaptações. Inicialmente, 10 g de amostra foram adicionados a 100 mL de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 2% (v/v) e submetidos ao aquecimento em autoclave (Phoenix Luferco, modelo AV-100), a 121 °C e 1 atm, por 15 min. Após o resfriamento a 22 °C, a suspensão foi centrifugada em centrífuga (Centrifuge MPW-351R, MPW® Med. Instruments, Polônia), a 9.000 rpm, por 10 min. O sobrenadante foi descartado, e o precipitado foi lavado por água destilada (H_2O), e centrifugado por 3 vezes, 9.000 rpm por 10 min. O sólido foi ressuspenso em 100 mL de tampão citrato de sódio 50 mmol L^{-1} (pH 4,8), e o pH foi ajustado para 4,6 com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 2 mol L^{-1} antes da hidrólise enzimática.

Peróxido de hidrogênio

O pré-tratamento com peróxido de hidrogênio seguiu a metodologia de Rabelo (2007), com modificações. Inicialmente, 10 g de amostra foram adicionados a 100 mL de solução de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 4,733% (v/v) e mantidos sob agitação de 150 rpm, por 1 h. Em seguida, a suspensão foi centrifugada em centrífuga (Centrifuge MPW-351R, MPW® Med. Instruments, Polônia), a 9.000 rpm, por 10 min. O sobrenadante foi descartado e o precipitado foi lavado por 35 mL de água destilada e centrifugado por 3 vezes. O sólido foi ressuspenso em 100 mL de tampão citrato de sódio 50 mmol L^{-1} (pH 4,8), e o pH foi ajustado para 4,6 com NaOH 2 mol L^{-1} antes da hidrólise enzimática.

Hidrotérmico

O pré-tratamento hidrotérmico convencional foi realizado seguindo metodologia de Silva *et al.* (2018), com modificações. Inicialmente, 10 g de amostra foram adicionados a 100 mL de tampão citrato de sódio 50 mmol L^{-1} (pH 4,8) e submetidos ao aquecimento em autoclave (Phoenix Luferco, modelo AV-100), a 121 °C e 1 atm, por 15 min. Após o resfriamento a 22 °C, o pH foi ajustado para 4,6 com NaOH 2 mol L^{-1}, e a suspensão foi encaminhada diretamente à hidrólise enzimática, sem separação da fase líquida.

Na condição hidrotérmica modificada, foram mantidas as mesmas condições de aquecimento. Após o resfriamento, a suspensão foi centrifugada em centrífuga (Centrifuge MPW-351R, MPW® Med. Instruments, Polônia), a 9.000 rpm, por 10 min; o sobrenadante foi descartado, e o precipitado sólido foi ressuspenso em 100 mL de tampão citrato de sódio novo, 50 mmol L^{-1} (pH 4,8). O pH foi ajustado para 4,6 com NaOH 2 mol L^{-1} antes da hidrólise enzimática.

Hidrólise enzimática

A hidrólise enzimática seguiu metodologia descrita por Silva *et al.* (2018), com adaptações. À biomassa pré-tratada e ressuspensa em 100 mL de tampão citrato de sódio 50 mmol L^{-1} (pH 4,6), foram adicionados 222 µL da preparação comercial de celulase - Celluclast® 1.5 L (Sigma-Aldrich), produzida por *Trichoderma reesei, com* atividade enzimática específica de aproximadamente 700 EGU g^{-1} (EGU – Unidade de endoglucanase). A suspensão foi incubada em agitador orbital (MA420, Marconi Equipamentos para Laboratórios Ltda., Piracicaba, SP, Brasil), a 150 rpm e 45 °C, por 24 h. Posteriormente, foram realizadas duas centrifugações sucessivas, a 9.000 rpm por 10 min, para remover sólidos suspensos residuais; o sobrenadante foi filtrado e utilizado na quantificação dos açúcares redutores totais (ART).

Determinações analíticas

Açúcares redutores totais

A concentração de açúcares redutores totais (ART) foi determinada pelo método do ácido 3,5-dinitrossalicílico (DNS), conforme Miller (1959), com adaptações. A curva de calibração foi preparada com soluções de sacarose de 0,1 a 1,0 g L^{-1}, submetidas à hidrólise ácida (HCl, 2 mol L^{-1}), antes da reação com DNS.

Imediatamente antes da análise, alíquotas dos hidrolisados já separadas da biomassa foram centrifugadas duas vezes, a 9.000 rpm por 5 min, para remover partículas remanescentes e reduzir interferências ópticas na leitura.

Para a hidrólise ácida, 0,5 mL do sobrenadante centrifugado foram transferidos para balão volumétrico de 100 mL, ao qual se adicionaram 9,5 mL de água destilada e 10 mL de ácido clorídrico (HCl) 2 mol L^{-1}. A mistura foi mantida em banho-maria por 10 min, a temperatura de ebulição. Após o resfriamento à 22 ± 2 ºC, adicionaram-se 10 mL de NaOH 2 mol L^{-1} e completou-se o volume com água destilada. Essa etapa encerrou a hidrólise ácida.

Para a reação colorimétrica, 1 mL da solução hidrolisada foi misturado a 1 mL de reagente DNS foram adicionados em tubo de ensaio. O branco foi preparado substituindo-se a amostra por água destilada. Os tubos foram mantidos em banho-maria por 8 min, a temperatura de ebulição, e imediatamente resfriados em banho de gelo por 8 min. Em seguida, adicionaram-se 16 mL de solução de tartarato de sódio e potássio, e a absorbância foi medida a 540 nm em espectrofotômetro UV-Visível (UV-1600 Spectrophotometer, Pró-Análise, Porto Alegre, RS, Brasil).

Tratamento estatístico

Os resultados, obtidos em triplicata (n = 3), foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey nas comparações múltiplas e pelo teste t de Student nas comparações entre duas médias, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$), com auxílio do software SASM.

Resultados e discussão

Distribuição granulométrica das matérias-primas

As Tabelas 1 e 2 e a Figura 1 apresentam a distribuição granulométrica da casca e da polpa de jatobá e da casca de pequi. A caracterização permite comparar o tamanho das partículas obtidas no material recebido e sua área superficial potencial; entretanto, como os pré-tratamentos foram aplicados à amostra integral e não a frações isoladas, os dados granulométricos não permitem atribuir, de forma independente, diferenças na hidrólise ao tamanho das partículas.

O diâmetro médio de Sauter (Dps) representa o diâmetro de uma partícula com a mesma relação entre volume e área superficial do conjunto particulado (Mccabe; Smith; Harriott, 2005). O Dps foi de 0,264 mm para o jatobá (Tabela 1) e 0,455 mm para o pequi (Tabela 2), respectivamente.

Para a biomassa de jatobá, 72,3% da massa total ficou concentrada nas faixas de 42–60 e 60–65 mesh. O menor Dps do jatobá em relação ao pequi, confirma a presença predominante de partículas mais finas no material de jatobá. Essa característica pode favorecer o contato com reagentes e enzimas, mas não deve ser interpretada como determinante isolada da conversão dos ART.

Tabela 1. Distribuição granulométrica, frações mássicas e parâmetros utilizados no cálculo do diâmetro médio de Sauter da casca e polpa de jatobá

Faixa (mesh)	Massa retida (g)	D+ (mm)	D- (mm)	di (mm)	xi (%)	Xi (%)	xi/di (mm^{-1})
12–16	0,162	1,680	1,190	1,435	0,336	99,664	0,002
16–20	0,136	1,190	0,841	1,015	0,282	99,381	0,003
20–32	0,810	0,841	0,557	0,699	1,682	97,700	0,024
32–35	0,622	0,557	0,500	0,528	1,291	96,408	0,024
35–42	1,729	0,500	0,394	0,447	3,590	92,818	0,080
42–60	18,240	0,394	0,250	0,322	37,871	54,948	1,176
60–65	16,579	0,250	0,230	0,240	34,422	20,526	1,434
65–80	9,529	0,230	0,177	0,204	19,784	0,741	0,972
80–100	0,091	0,177	0,149	0,163	0,189	0,552	0,012
100–115	0,053	0,149	0,131	0,140	0,110	0,442	0,008
115–170	0,088	0,131	0,088	0,110	0,183	0,260	0,017
170–200	0,063	0,088	0,074	0,081	0,131	0,129	0,016
200–270	0,062	0,074	0,053	0,064	0,129	-0,000	0,020

Nota: D+ e D- correspondem às aberturas das peneiras que delimitam a classe; di é o diâmetro médio da classe; xi é a fração mássica retida; Xi é a fração acumulada passante, Diâmetro médio de Sauter do jatobá: Dps = 0,264 mm.

Tabela 2. Distribuição granulométrica, frações mássicas e parâmetros utilizados no cálculo do diâmetro médio de Sauter da casca de pequi

Faixa (mesh)	Massa retida (g)	D+ (mm)	D- (mm)	di (mm)	xi (%)	Xi passante (%)	xi/di (mm^{-1})
12–16	0,234	1,680	1,190	1,435	0,621	99,379	0,004
16–20	0,742	1,190	0,841	1,015	1,968	97,411	0,019
20–32	7,720	0,841	0,557	0,699	20,481	76,930	0,293
32–35	10,466	0,557	0,500	0,528	27,766	49,164	0,525
35–42	11,016	0,500	0,394	0,447	29,225	19,940	0,654
42–60	5,893	0,394	0,250	0,322	15,634	4,306	0,486
60–65	0,976	0,250	0,230	0,240	2,589	1,716	0,108
65–80	0,142	0,230	0,177	0,204	0,377	1,340	0,019
80–100	0,270	0,177	0,149	0,163	0,716	0,623	0,044
100–115	0,206	0,149	0,131	0,140	0,547	0,077	0,039
115–170	0,029	0,131	0,088	0,110	0,077	0,000	0,007

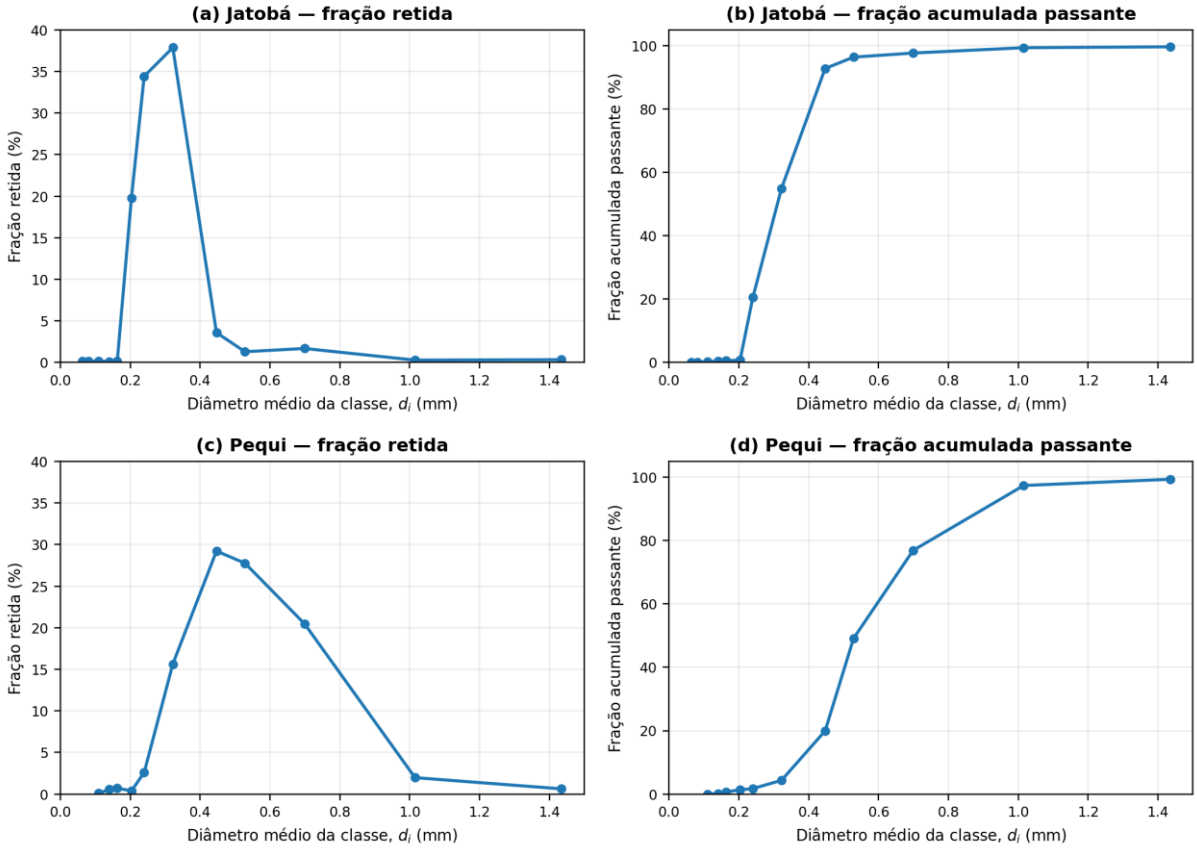
Nota: D+ e D- correspondem às aberturas das peneiras que delimitam a classe; di é o diâmetro médio da classe; xi é a fração mássica retida; Xi é a fração acumulada passante, Diâmetro médio de Sauter do pequi: Dps = 0,455 mm.

A biomassa de pequi apresentou 77,5% da massa nas faixas de 20–32, 32–35 e 35–42 mesh, com Dps de 0,455 mm (Tabela 2) superior ao do jatobá. Esse resultado indica predominância de partículas maiores, possivelmente associada à maior resistência mecânica da casca durante a desintegração. A diferença física entre as biomassas pode influenciar a transferência de massa, mas seu efeito não foi avaliado separadamente do efeito dos pré-tratamentos.

A Figura 1 apresenta os histogramas de frequência da fração retida (%) e as curvas de fração acumulada (%) em função do diâmetro médio – di (mm). O jatobá apresentou máximo de retenção nas classes de menor diâmetro, enquanto o pequi apresentou maior frequência nas classes intermediárias de 20–42 mesh.

As curvas acumuladas confirmam a distribuição mais fina do jatobá e mais grossa do pequi, sendo que aproximadamente 50% das partículas apresentam diâmetro médio de 0,32 mm para o jatobá e 0,53 mm para o pequi, respectivamente. Essa diferença deve ser considerada nas etapas de mistura, transferência de massa, pré-tratamento e na hidrólise enzimática.

Figura 1. Histogramas de frequência com a distribuição granulométrica das matérias-primas: (a) fração retida do jatobá; (b) fração acumulada passante do jatobá; (c) fração retida do pequi; e (d) fração acumulada passante do pequi, respectivamente (di: diâmetro médio da classe granulométrica)



Fonte: Autores, 2026.

Assim, nas condições estudadas, o tipo de pré-tratamento mostrou-se mais determinante para a conversão de açúcares do que a granulometria global da biomassa. Para quantificar a contribuição da granulometria, recomenda-se um experimento fatorial com faixas de tamanho controladas, mantendo constantes a carga de sólidos, o pré-tratamento e a carga enzimática.

Características dos extratos após os pré-tratamentos e a hidrólise enzimática

Após a caracterização granulométrica, as biomassas de jatobá e pequi foram submetidas aos quatro pré-tratamentos, seguidos de hidrólise enzimática. A resposta de cada condição foi avaliada pela concentração de ART expressa em gramas por 100 g de biomassa, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Concentração de açúcares redutores totais (g/100 g de biomassa) após hidrólise enzimática das amostras submetidas aos quatro pré-tratamentos

Matéria-prima	Açúcares redutores totais (g/100 g de biomassa)			
	Hidrotérmico convencional	**Hidrotérmico modificado**	**Ácido sulfúrico 2% (v/v)**	**Peróxido de hidrogênio 4,733% (v/v)**
Jatobá	$25,77^{aA} \pm 0,73$	$10,19^{bB} \pm 0,82$	$6,20^{cB} \pm 0,64$	$7,61^{cB} \pm 0,56$
Pequi	$24,66^{aB} \pm 0,94$	$16,06^{bA} \pm 0,67$	$7,59^{cA} \pm 0,33$	$9,83^{cA} \pm 0,51$

* Valores expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Letras minúsculas iguais na mesma linha indicam ausência de diferença significativa entre os tratamentos; letras maiúsculas iguais na mesma coluna indicam ausência de diferença significativa entre as biomassas ($p > 0,05$; teste de Tukey ou teste t de Student).

Houve efeito significativo do tipo de pré-tratamento sobre a concentração de ART ($p < 0,05$). O hidrotérmico convencional apresentou os maiores valores para as duas biomassas e foi estatisticamente ($p<0,05$) superior às demais condições. Esse resultado evidencia que a forma de desestruturação da matriz lignocelulósica teve influência mais clara que a diferença granulométrica global entre as matérias-primas.

O desempenho do tratamento hidrotérmico pode estar relacionado à solubilização parcial da hemicelulose e ao rompimento de interações entre lignina e carboidratos, aumentando a acessibilidade da celulose à ação enzimática. Por não empregar ácido ou peróxido durante o aquecimento, essa rota pode reduzir o consumo de reagentes, as etapas de neutralização e a geração de efluentes químicos. Entretanto, uma possível vantagem econômica não pode ser afirmada apenas com estes dados, pois o consumo energético da autoclave e os custos de escala devem ser avaliados em estudo técnico-econômico (Soltanian *et al.*, 2020; Basera; Chakraborty; Sharma, 2024).

O hidrotérmico modificado apresentou desempenho intermediário e, para ambas as biomassas, permaneceu abaixo do hidrotérmico convencional. A remoção do sobrenadante e a ressuspensão do sólido em tampão novo podem ter retirado açúcares solubilizados durante o aquecimento, contribuindo para os menores valores medidos ao final do processo.

As condições com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio apresentaram as menores concentrações de ART. Em tratamentos químicos, combinações inadequadas de concentração, temperatura e tempo podem promover degradação de açúcares e formação de compostos inibidores, como furfural e hidroximetilfurfural (Mankar *et al.*, 2021; Basera; Chakraborty; Sharma, 2024). Como não foram avaliadas outras concentrações ou tempos de tratamento, as conclusões devem ser restritas às condições experimentais utilizadas.

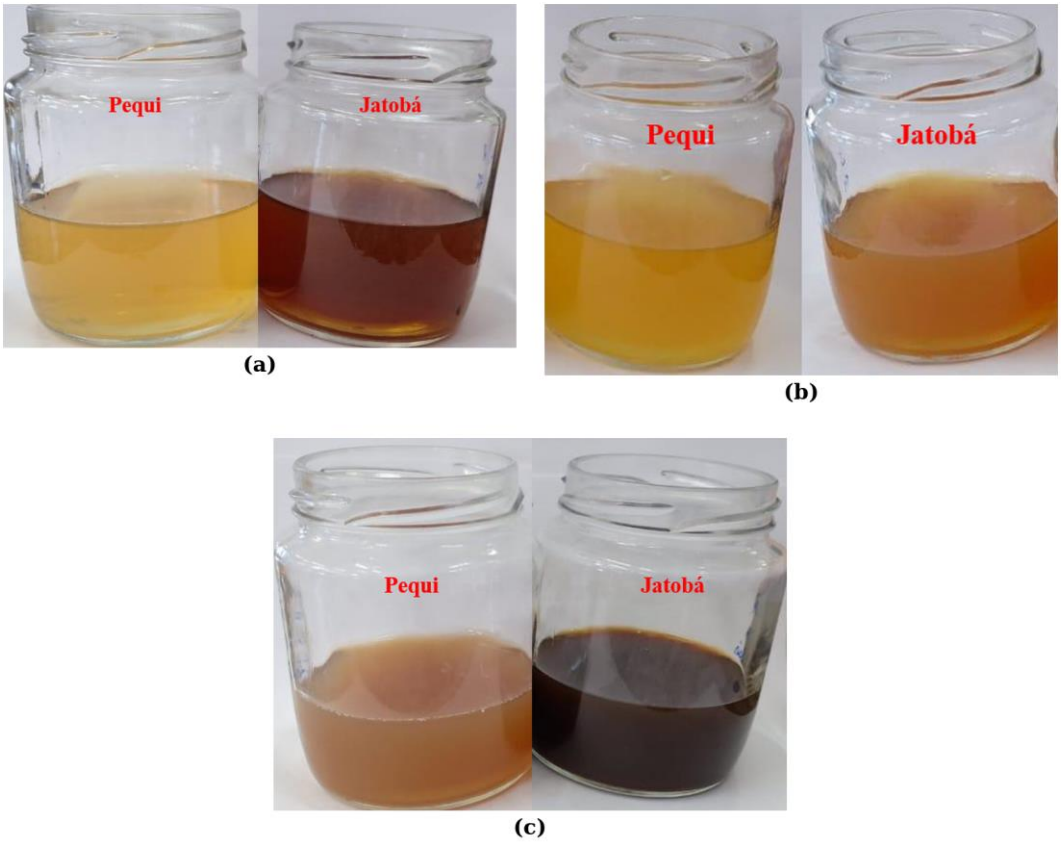
Na comparação entre as matérias-primas, o pequi apresentou maiores concentrações de ART nas condições hidrotérmica modificada, com ácido sulfúrico e com peróxido de hidrogênio, enquanto o jatobá apresentou valor ligeiramente superior apenas no hidrotérmico convencional. Essas diferenças podem decorrer da composição e da organização estrutural específicas de cada biomassa, especialmente das proporções e interações entre celulose, hemicelulose e lignina (Mankar *et al.*, 2021; Broda; Yelle; Serwańska, 2022).

Considerando a concentração de ART, a ausência de reagentes químicos agressivos e a simplicidade do meio, o hidrotérmico convencional é a condição mais indicada para estudos de ampliação de escala. Ainda assim, a recomendação industrial definitiva requer balanços de massa e energia, avaliação da recuperação de calor, consumo de água, formação de inibidores e análise econômica.

Além da quantificação de ART, foi realizada apenas uma avaliação visual dos extratos registrados na Figura 2. Não foram efetuadas análises instrumentais de cor ou turbidez; por isso, as imagens não foram utilizadas para inferir composição química, grau de solubilização ou eficiência do pré-tratamento.

As diferenças de coloração observadas nas amostras são apresentadas apenas como documentação do aspecto visual. No entanto, como não foram realizadas leituras de absorbância, cor, turbidez ou composição dos extratos, não é possível associar de forma conclusiva a maior ou menor intensidade visual à solubilização de lignina, hemicelulose ou compostos fenólicos. A coincidência entre a coloração mais escura de alguns extratos e os maiores valores de ART deve ser tratada apenas como observação, e não como relação causal. A conclusão sobre a eficiência dos tratamentos foi baseada exclusivamente nos resultados quantitativos da Tabela 3 e na análise estatística.

Figura 2. Aspecto visual dos extratos de pequi e jatobá e após os pré-tratamentos: (a) ácido sulfúrico a 2% (v/v); (b) peróxido de hidrogênio a 4,733% (v/v); e (c) hidrotérmico convencional, respectivamente



Fonte: Autores, 2026.

A relação com o peneiramento também deve ser interpretada com cautela: embora o jatobá tenha apresentado partículas mais finas, ele superou o pequi apenas no hidrotérmico convencional. Esse comportamento reforça que o tipo de pré-tratamento foi o fator mais determinante entre os avaliados, enquanto a contribuição específica da granulometria permanece a ser investigada em ensaios controlados.

Conclusão

A análise granulométrica evidenciou diferenças físicas entre as biomassas, com diâmetro médio de Sauter de 0,264 mm para o jatobá e 0,455 mm para o pequi, que podem influenciar os processos de conversão da biomassa em ART. Entre as condições avaliadas, o pré-tratamento hidrotérmico convencional apresentou as maiores concentrações de ART para as duas biomassas, indicando que o tipo de pré-tratamento foi o fator mais determinante nas condições estudadas.

Conclui-se que a casca de pequi e a casca e a polpa de jatobá são fontes promissoras para a obtenção de açúcares fermentescíveis com potencial aplicação na produção de bioetanol. Para continuidade do estudo, recomenda-se priorizar o pré-

tratamento hidrotérmico convencional, avaliar faixas granulométricas controladas e complementar o estudo com caracterização das biomassas, quantificação de inibidores, fermentação dos hidrolisados, destilação do fermentado e análise técnico-econômica em escala ampliada.

REFERÊNCIAS

BASERA, P.; CHAKRABORTY, S.; SHARMA, N. Lignocellulosic biomass: insights into enzymatic hydrolysis, influential factors, and economic viability. **Discover Sustainability**, v. 5, art. 311, 2024. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00543-5.

BRODA, M.; YELLE, D. J.; SERWAŃSKA, K. Bioethanol production from lignocellulosic biomass—challenges and solutions. **Molecules**, v. 27, n. 24, art. 8717, 2022. https://doi.org/10.3390/molecules27248717.

CHANDEL, A. K.; SILVA, S. S. **Sustainable second generation bioethanol:** in vitro production and commercialization. Berlin: Springer, 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3348-4.

CARLI, C. M. **Hidrólise e Fermentação do Bagaço de Cana-de-Açúcar em Escala de Bancada para Produção de Etanol 2G**. 2011. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP.

KUMAR, R. *et al.* Biological pretreatment of lignocellulosic biomass as a sustainable option for biofuel production. **Next Sustainability**, v. 5, art. 100133, 2025. https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100133.

MANKAR, A. R. *et al.* Pretreatment of lignocellulosic biomass: a review on recent advances. **Bioresource Technology**, v. 334, art. 125235, 2021. https://doi.org/ 10.1016/j.biortech.2021.125235.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959. https://doi.org/10.1021/ac60147a030.

RABELO, S. C. **Avaliação de desempenho do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino para a hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de

Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12733/1605134.

SHUKLA, A. *et al.* Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 16, art. 44, 2023. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2.

SILVA, J. dos S. *et al.* Hidrólise enzimática, fermentação e produção de biocombustíveis através da coroa de *Ananas comosus*. **Química Nova**, v. 41, p. 1127-1131, 2018. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170281.

SOLTANIAN, S. *et al.* A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels. **Energy Conversion and Management**, v. 212, art. 112792, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112792.

VALDUGA, E. *et al.* Pré-tratamentos de melaço de cana-de-açúcar e água de maceração de milho para a bioprodução de carotenoides. **Química Nova**, v. 30, n. 8, p. 1860-1866, 2007. https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000800012.

WOŹNIAK, A. *et al.* Review of lignocellulosic biomass pretreatment using physical, thermal and chemical methods for higher yields in bioethanol production. **Sustainabilit***y*, v. 17, n. 1, art. 287, 2025. https://doi.org/10.3390/su17010287.

ZHAO, X.; ZHANG, L.; LIU, D. Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, n. 4, p. 465-482, 2012. https://doi.org/10.1002/bbb.1331.

CAPÍTULO 6

SÍNTESE E APLICAÇÃO DE HIDRÓXIDOS DUPLOS LAMELARES HIDROFÓBICOS E MAGNÉTICOS: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ADSORTIVAS E FOTOCATALÍTICAS PARA REMOÇÃO DE CORANTES DE SOLUÇÕES AQUOSAS

Giovani Balen Grass[1], Gabriela Mesquita Bruel[2], Rogério Marcos Dallago[3]

[1]Acadêmico do Curso de Engenharia Química (URI) – giovanibalengrass@outlook.com
[2]Pós graduanda em Engenharia de Alimentos (URI) – gabi.mesquita.bruel@gmail.com
[3]Prof. Dr. do Curso de Engenharia Química (URI) – dallago@uricer.edu.br

RESUMO: O crescimento de atividades industriais produz aumento de poluição por espécies denominadas recalcitrantes, e exige utilização de métodos de tratamentos mais sofisticados, com destaque à fotocatálise heterogênea, um tipo de processo oxidativo avançado. Sintetizou-se três variedades de hidróxido duplo lamelar (HDL) hidrofóbico com e sem magnetita por co-precipitação e tratamentos superficiais. Os novos materiais foram submetidos a testes de adsorção, e fotocatálise em reator de vidro com lâmpada de mercúrio para testes sob luz UV. Empregou-se os corantes azul de metileno, amarelo tartrazina e vermelho 40 para os testes, e espectrofotometria UV-Vis para análise de resultados. Todas as argilas aniônicas exibiram alta eficiência na remoção do corante catiônico azul de metileno (>98%). Em contrapartida, os corantes aniônicos demonstraram menor afinidade com os HDLs, de modo que a hidrotalcita convencional apresenta o melhor desempenho, com até 87% de remoção. A presença de irradiação ultravioleta potencializou significativamente a descoloração em todos os cenários experimentais. A adição de H_2O_2 auxiliou na degradação, particularmente na presença de magnetita. Conclui-se que, apesar das limitações adsortivas causadas pela magnetita frente a compostos aniônicos, a atuação fotocatalítica e facilidade de separação magnética consolidam os materiais desenvolvidos como uma rota tecnológica promissora para tratamento avançado de efluentes industriais.

Palavras-chave: HDL. Fotocatálise Heterogênea. Espectrofotometria.

Introdução

Entre matérias jornalísticas e artigos científicos, não é incomum se deparar com tópicos concernentes à preservação do meio ambiente. É frequente menção da palavra "poluição", uma definição ampla para qualquer tipo de degradação ou deterioração da natureza provocada pelo ser humano (Dicio, 2026). Um dos tipos mais comuns desta é a poluição por agentes orgânicos, derivados de diversos tipos de serviços e indústrias (Santos *et al.*, 2026).

Dessa forma, cria-se uma variedade de normas e exigências quanto ao descarte apropriado de efluentes para evitar a possível contaminação de mananciais de suma importância para abastecimento de cidades e comunidades, ocasionando uma necessidade de meios de tratamento. Para certos tipos de espécies químicas denominadas refratárias, recalcitrantes ou POPs (poluentes orgânicos persistentes), incluindo certos insumos agrícolas, fármacos e corantes, os clássicos tratamentos físico-químicos (coagulação/decantação) e biológicos (lodo ativado) têm eficiência limitada, já que essas moléculas não se agregam facilmente em aglomerados, nem são facilmente biodegradáveis (Dantas *et al.*, 2024). Apesar legislação ambiental ser, frequentemente, pouco específica quanto aos padrões concernentes ao descarte de diversos desses compostos (CONAMA, 2011), não é incomum que as indústrias, cientes dos riscos representados por esses agentes químicos, tomem iniciativas para evitar sua dispersão (Brown, 2025 e Gilbert, 2007).

Nesse contexto, os POAs (processos oxidativos avançados) são tecnologias de tratamento que ocasionam a degradação de compostos orgânicos até sua completa mineralização, gerando água, dióxido de carbono e sais minerais. Esse processo ocorre através da geração de radicais hidroxila (·OH), conhecidos por seu forte poder oxidante e que, se gerados em quantidade suficiente, constituem um método de tratamento mais sustentável. Tal característica decorre da ausência de adição de elementos que necessitem de retirada posterior, aliada à sua eficácia para qualquer tipo de poluente orgânico, dada a baixa seletividade das reações decorrente da alta reatividade dos radicais. Os POAs se classificam em dois conjuntos: homogêneos, como reações de Fenton, processos envolvendo H_2O_2/UV, sistemas com Ozônio (O_3) e Foto-Fenton; e heterogêneos, envolvendo sistemas com mais de uma fase, onde se encontram o Fenton heterogêneo e a fotocatálise heterogênea (Fox e Dulay, 1993 e Ameta e Ameta, 2018).

Considerando a fotocatálise heterogênea, é comum o uso de semicondutores que excitam seus elétrons da banda de valência para a de condução ao receberem irradiação de um fóton com a energia adequada (Callister Jr., 2020). Esses elétrons podem, então, participar de reações de oxido-redução para degradar compostos orgânicos, seja na oxidação de moléculas através de radicais, ou de redução de certas espécies reativas através das lacunas deixadas na banda de valência. No entanto, semicondutores comumente utilizados para fotocatálise não apresentam boa eficiência quando empregados de forma isolada, dada a sua baixa área superficial,

dificuldade de recuperação e, ainda, recombinação muito rápida de elétrons e lacunas (Denti, 2023).

Dentro desse tema, os hidróxidos duplos lamelares (HDLs ou, no inglês, LDHs), também chamados de argilas aniônicas ou hidrotalcitas, têm sido objeto de estudo para o tratamento de efluentes (Pasquali *et al.*, 2024). Uma ampla gama de combinações entre cátions metálicos bi e trivalentes são compatíveis com a síntese desse material, sendo Mg_{+2} e Al^{+3} os mais comumente utilizados por sua facilidade de obtenção, além de resultarem em um material satisfatório (Miotto, 2013). Esses materiais possuem capacidade de troca iônica, possibilitando que eles extraiam íons indesejados de um meio. Também dispõem de uma área superficial relativamente grande, tornando-os propícios para adsorver poluentes e atuar como suportes para semicondutores fotossensíveis.

Existem algumas variedades de HDL que apresentam, intrinsecamente, a propriedade fotocatalítica (Denti, 2023). Segundo Xia *et al.* (2014) e Yang *et al.* (2016), por possuírem de dois a três metais em sua composição, as hidrotalcitas proporcionam instabilidade nos estados de energia entre as bandas de valência e de condução. Estes, mediante a incidência de fótons de luz, podem impulsionar a geração e transmissão de elétrons da banda de valência para a banda de condução, proporcionando propriedades fotocatalíticas no HDL, seja ele magnético ou não.

Podem ser incorporados diversos aditivos às argilas aniônicas para potencializar sua funcionalidade, a exemplo da magnetita que, além de facilitar a recuperação do material, é capaz de prover íons de ferro, podendo catalisar processos de Fenton e Foto-Fenton (Ameta *et al.*, 2018) em paralelo à fotocatálise. A propriedade hidrofóbica, por outro lado, promove uma afinidade maior com moléculas orgânicas, incluindo poluentes, tornando a sua remoção mais eficiente (Miotto, 2013 e Ruan *et al.*, 2013).

Sendo assim, o presente trabalho objetiva realizar a síntese de hidrotalcitas hidrofóbicas, com e sem a adição de magnetita, para avaliar as propriedades adsortivas e fotocatalíticas dessas variedades do material frente a alguns corantes comumente presentes em efluentes industriais, contribuindo para a compreensão das relações estrutura-propriedade em LDHs funcionalizados e obtendo informações sobre sua aplicação no tratamento de águas residuais. Estipula-se que a incorporação de magnetita aumente a eficiência fotocatalítica do processo, gerando mais espécies oxidantes para a degradação dos corantes utilizados como efluente sintético.

Metodologia

Síntese do HDL Hidrofóbica Mg/Al (HDL-SDS)

O HDL hidrofóbico não magnético foi sintetizado através do método de co-precipitação a pH variável seguindo o procedimento descrito por Denti (2023) com modificações. Duas soluções foram preparadas:

- **A:** 25,63g de nitrato de magnésio hexahidratado ($Mg(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$) e 12,5g de nitrato de alumínio nonahidratado ($Al(NO_3)_3{\cdot}9H_2O$) em 71,34g de água deionizada;
- **B:** 8g de hidróxido de sódio (NaOH) e 8,65g de dodecil sulfato de sódio ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) em 115g de água deionizada.

A solução A foi gotejada sobre a solução B sob agitação magnética, a uma vazão aproximada de 5 mL/min, obtendo-se um precipitado branco. O sólido foi filtrado a vácuo e lavado com água deionizada até que o filtrado atingisse pH 7 e, posteriormente, seco em forno tipo estufa a 105°C *overnight*.

HDL magnético via co-precipitação com Fe_3O_4 pré-sintetizada (HDL-SDSM#1)

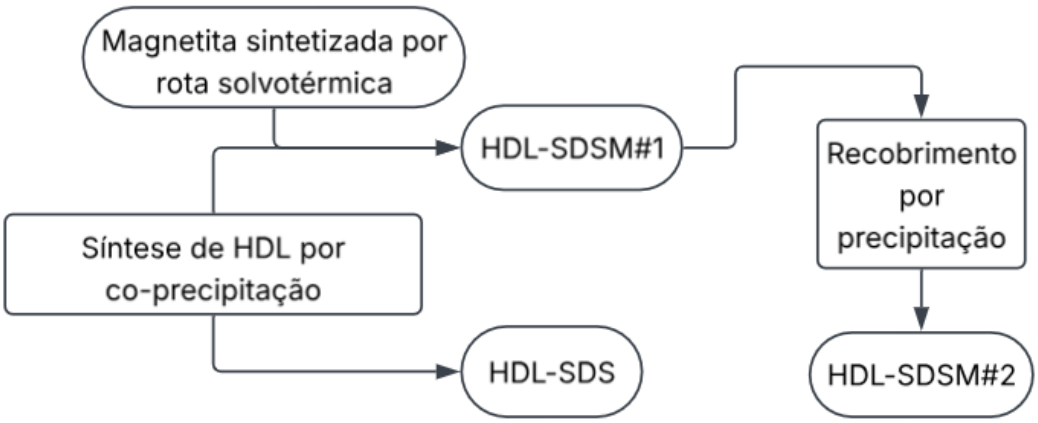
Para a primeira variedade magnética do HDL, doravante denominada HDL-SDSM#1, foi utilizada a metodologia adaptada de Miotto (2013). O primeiro passo foi a síntese da magnetita (Fe_3O_4) a partir de uma rota solvotérmica. Dissolveram-se 2,7 g de cloreto férrico hexahidratado ($FeCl_3{\cdot}6H_2O$) em 50 mL de etilenoglicol. Após aquecimento da solução a 40°C em banho maria por 10 minutos sob agitação magnética, acrescentaram-se outros 50 mL de etilenoglicol, bem como 6,12 g de acetato de sódio trihidratado ($CH_3COONa{\cdot}3H_2O$). A solução resultante foi distribuída em 2 autoclaves de inox revestidas de teflon com capacidade útil de 50 mL, as quais permaneceram em forno tipo mufla por 6h na temperatura de 250 °C. Após centrifugação em tubos Falcon de 50 mL, a magnetita sintetizada foi transferida para cadinhos de porcelana e seca em forno tipo estufa a 80°C *overnight*. Da massa resultante, 0,377 g foram adicionadas à solução B, anteriormente descrita para síntese do HDL-SDS.

HDL magnético via precipitação superficial de Fe_3O_4 (HDL-SDSM#2)

A segunda variedade magnética, doravante referida por HDL-SDSM#2, parte do HDL-SDSM#1, submetido a uma segunda etapa de tratamento superficial. A metodologia é adaptada de Conceição *et al* (2007), consistindo na preparação de uma suspensão de 0,5 g de hidrotalcita em uma solução de 400 mL contendo 0,5 g de cloreto férrico hexahidratado e 1,2 g de sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4{\cdot}7H_2O$), aquecida a 70 °C e sob agitação mecânica. Para esse meio, foram gradualmente gotejados 30 mL de uma solução de NaOH 5 M, conduzindo à precipitação da magnetita na superfície do HDL. O material foi lavado até pH neutro e seco em forno tipo estufa a 70 °C por 18 h.

Para maior clareza na ordem de síntese e ponto de partida dos materiais, os processos foram resumidos na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma Descritivo da Síntese dos HDLs



Fonte: Autores, 2026.

Ponto de Carga Zero dos HDLs

Para encontrar o pH onde as cargas da superfície das hidrotalcitas são neutras, adaptou-se uma metodologia de Macruz *et al.* (2022). Dez tubos Falcon de 50 mL foram carregados com 20 mL de uma solução de NaCl 0,1M. Com o auxílio de soluções de HCl e NaOH 0,1M, cada tubo foi corrigido para uma faixa de pH, variando de 2 a 12, sendo adicionados 20 mg de HDL particulado ao meio.

Os tubos foram transferidos para um agitador orbital a 20°C e 120 rpm por 24h. Exaurido este tempo, o conteúdo de cada tubo foi filtrado individualmente, tendo seu pH final medido com o auxílio de um pHmetro.

Densidade Aparente

A densidade aparente foi determinada pesando-se um determinado volume dos materiais sintetizados empregando uma proveta de 5 mL. A densidade aparente foi calculada dividindo a massa, em g, pelo volume ocupado, em mL.

Caracterização por DRX e FTIR-ATR

Visando confirmar a formação do material de interesse, utilizaram-se 2 métodos analíticos. O HDL-SDS foi caracterizado pelo método de difração de raios X (DRX) (Rigaku, Miniflex II) para verificar a orientação preferencial da estrutura cristalina do material. Aproximadamente 20 mg de partículas foram colocadas em placas de vidro e inseridas no difratômetro. As análises foram realizadas com radiação de raios X CuKα (λ=1,58 Å) com um gerador de tensão de 30 kV na variação de ângulo (2θ) de 2° a 70° a uma taxa de varredura de 2°/min.

Semelhantemente, realizaram-se análises de Espectroscopia no Infravermelho Transformada de Fourier (FTIR) pelo método de Reflectância Total Atenuada (ATR),

com o objetivo de verificar a incorporação do ânion dodecil sulfato de sódio e da magnetita na estrutura do material. Para tal, o aparelho (Agilent, Cary 630), inicialmente, registrou um diagrama vazio, posteriormente subtraindo-o dos diagramas individuais dos 3 HDLs sintetizados. Espalhou-se o material particulado sobre o cristal, utilizando-se quantidade suficiente para cobrir sua superfície. A haste de pressão foi então, engajada sobre o sistema, realizando-se a leitura numa faixa de 650-4000 cm^{-1}.

Experimentos de Adsorção e Fotocatálise

Os ensaios adsortivos foram conduzidos em frascos tipo Erlenmeyer de 125 mL, com 0,125g de adsorvente e 50 mL de solução dos corantes azul de metileno (50 ppm, pH 8), catiônico, e amarelo tartrazina (250 ppm, pH 4) e vermelho 40 (250 ppm, pH 4), azo-aniônicos. As concentrações iniciais foram ajustadas para satisfazer os métodos de análise de remoção, e o pH de cada espécie química foi ajustado com soluções de HCl ou NaOH 0,1M, considerando o ponto de carga zero das hidrotalcitas sintetizadas, bem como as cargas de cada corante e suas constantes de dissociação.

Os Erlenmeyers foram colocados em aparelho shaker a 150 rpm e 20°C. A cinética de remoção de cor foi acompanhada mediante análises espectrofotométricas em diferentes tempos de adsorção: 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 180 e 240 minutos após o início. Retiraram-se alíquotas de 1 mL, submetendo-as a um filtro PVDF 0,45 µm (previamente saturado com solução de corante) para remoção de material particulado e diluindo-as até um volume de 8 mL para análise espectrofotométrica UV-Vis (Shimadzu, UV-1900i) em 662 nm (azul de metileno), 426 nm (amarelo tartrazina) e 505 nm (vermelho 40). O percentual removido de cada corante foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$\text{Remoção (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \qquad (1)$$

Onde C_0 é a concentração inicial do corante (ppm) e C_t é a concentração no tempo t. Para cada condição experimental, foram realizadas medições em duplicata.

Os ensaios fotocatalíticos foram conduzidos nas mesmas condições iniciais, em um reator de vidro encamisado com circulação de água a 20 °C, acondicionado em uma câmara de madeira, conforme retratado na Figura 2. As paredes internas foram revestidas de papel alumínio para melhor reflexão da irradiação UV gerada por uma lâmpada de mercúrio, posicionada 12 cm acima do reator.

Figura 2. Câmara de ensaios fotocatalíticos



Fonte: Autores, 2026.

Para a retirada das alíquotas nesse ensaio, uma mangueira foi inserida por um orifício na lateral da caixa e presa ao reator, de modo que sua extremidade permanecesse mergulhada no meio reacional. Essa configuração possibilitou a obtenção de alíquotas nos mesmos tempos utilizados nos ensaios adsortivos com o auxílio de uma seringa, não requerendo, assim, desligamento da lâmpada ou exposição desnecessária à irradiação UV no momento da coleta.

Paralelamente, avaliou-se o efeito do emprego de um agente oxidante auxiliar, mediante a adição de 1 mL de H_2O_2 5% ao início do processo, com base em resultados de estudos anteriores conduzidos pela equipe de pesquisa. Ademais, foram realizados ensaios de fotólise, isto é, sem a presença do HDL sob UV, a fim de determinar as diferenças na cinética e na remoção final nessas condições.

Resultados e discussões

As densidades aparentes determinadas para os 3 materiais sintetizados estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade aparente dos materiais

Material	Densidade aparente (g/cm³)
HDL-SDS	0,256
HDL-SDSM#1	0,348
HDL-SDSM#2	0,675

Fonte: Autores, 2026.

Todos os materiais apresentaram baixos valores, inferiores a 1 g/mL, para a suas densidades aparentes, característico de materiais sintetizados contendo, como íon de compensação, o dodecil sulfato de sódio (SDS). Seu elevado tamanho molecular em relação ao íon carbonato, comumente utilizado, favorece a síntese de HDLs com camadas lamelares mais espaçadas, proporcionando aumento de seus volumes e, consequentemente, diminuição de suas densidades aparentes.

A incorporação da magnetita (Fe_3O_4), ocasiona um aumento da densidade aparente em relação ao HDL sintetizado somente com SDS. Esta tendência era esperada, uma vez que a magnetita se caracteriza por apresentar, comparativamente, uma elevada densidade aparente de ~ 1,5 g/mL. Dentre os materiais magnéticos sintetizados, a HDL-SDSM#2, com uma densidade de 0,675 g/mL, foi a que apresentou a maior densidade, quase 2 vezes superior à HDL-SDSM#1. Esta maior densidade sugere uma maior incorporação de material magnético a estrutura da HDL-SDSM#2, corroborando com esta hipótese a diferença de coloração e magnetismo observada entre as amostras magnéticas (HDL-SDSM#2 > HDL-SDSM#1).

Em relação a coloração, a HDL-SDS apresentou uma coloração branca, enquanto as variantes HDLs SDSM#1 e SDSM#2, apresentaram distintas tonalidades de cinza, evidenciando a presença do óxido de ferro em suas composições. Dentre as hidrotalcitas magnéticas, a HDL-SDSM#2 apresentou uma coloração cinza mais intensa, tendendo para o preto, e levemente alaranjado nas bordas, sugerindo visualmente a presença de um maior teor de magnetita em sua composição, bem como uma efetiva dispersão superficial.

Conforme mostrado na Figura 3, o HDL-SDSM#2 apresentou, qualitativamente, um magnetismo superior ao do HDL-SDSM#1.

Figura 3. HDL-SDSM#1 na ausência (a) e presença (b) de ímã e HDL-SDSM#2 na ausência (c) e presença (d) de imã



(a) (b) (c) (d)

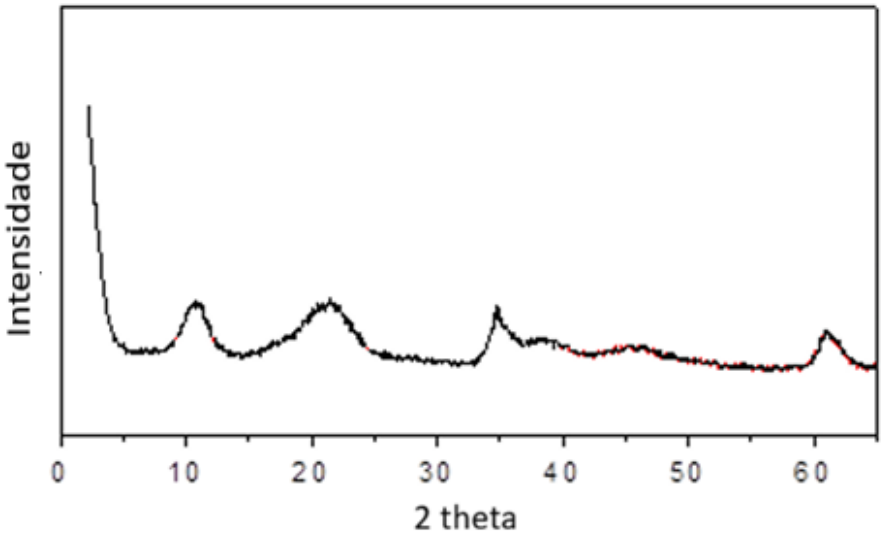
Fonte: Autores, 2026.

Ambas as tendências, diferença de coloração e de magnetismo, foram vinculados aos distintos processos de síntese para obtenção do material magnético. Na co-precipitação do HDL-SDSM#1 a magnetita é incorporada internamente à estrutura lamelar durante sua síntese, proporcionando uma dispersão homogênea da magnetita em toda a estrutura sintetizada, como um encapsulamento. Este processo limita a exposição da substância magnética, influenciando negativamente no seu magnetismo.

Diferentemente do HDL-SDSM#1, o HDL-SDSM#2 envolve síntese *in situ* da magnetita no meio reacional contendo HDL previamente sintetizado, proporcionando um recobrimento superficial das partículas de HDL, o que favorece seu magnetismo.

O perfil DRX do material sintetizado sem magnetita está disposto na Figura 4. Picos basais em d_{003} (~11º), d_{006} (~23º), d_{012} (~35º) e d_{110} (~61º), além de halos sutis em d_{015} (39,09º), d_{018} (46,09º) confirmam a formação de estrutura tipo HDL. Em comparação com os dados obtidos por Denti (2023) para um HDL hidrofílico com carbonato, esses picos apresentaram uma menor cristalinidade, indicada pela diminuição das intensidades dos picos e pelo aumento de suas larguras. Este fato indica que a ordem de empilhamento das lamelas diminui com a presença do dodecil sulfato de sódio (Zhu *et al.*, 2008). Observa-se também que, com a intercalação do surfactante aniônico, o pico do plano d_{003} foi, comparativamente, deslocado na direção de menor valor de 2θ, devido ao aumento do espaçamento basal.

Figura 4. Diagrama de Difração de Raios X para o material HDL-SDS

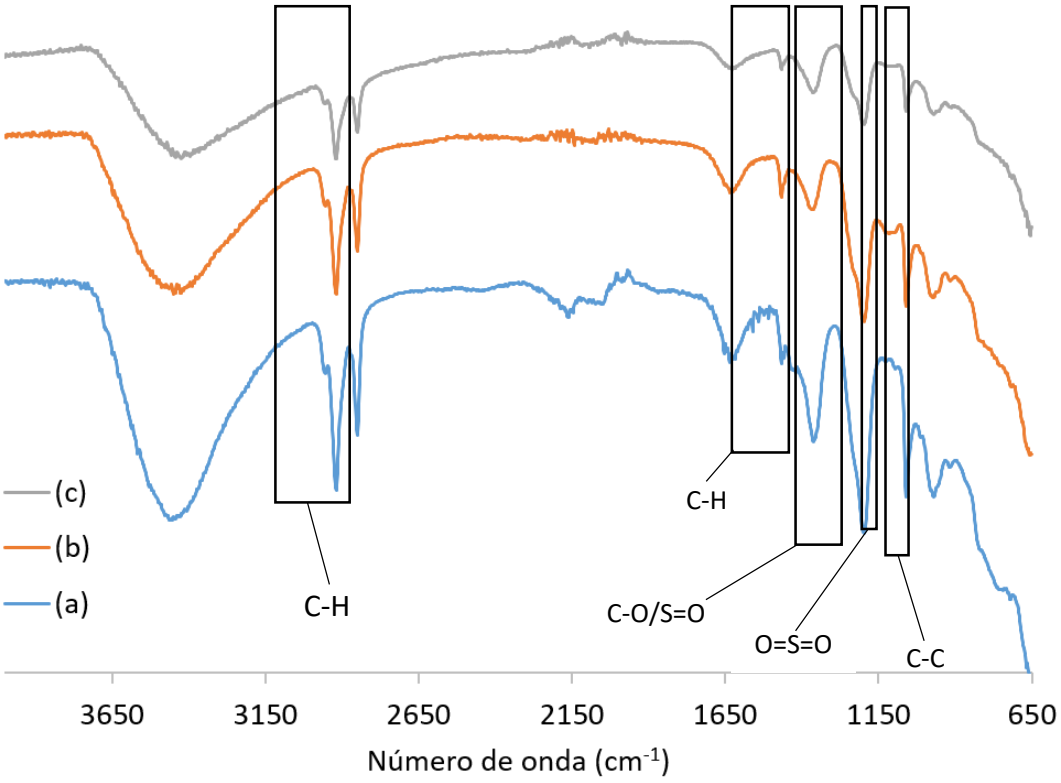


Fonte: Autores, 2026.

O espectro de infravermelho FTIR-ATR dos HDLs é apresentado na Figura 5. É possível identificar um pico em 960 cm^{-1}, que sugere a presença de ligações C–C. Os picos em 2.840 e 2.920 cm^{-1} são característicos de ligações C–H, e aquele em 1.360 cm^{-1} é atribuído a vibrações angulares simétricas da cadeia hidrocarbônica, correspondentes ao SDS.

Próximos aos 1.200 cm^{-1}, há uma banda forte, característica de frequência simétrica de sulfatos orgânicos (ligações S=O e C-O), confirmando a presença do dodecil sulfato de sódio. Sua incorporação é reforçada pelas deformações assimétricas (menor frequência) em ~1415 cm^{-1}, próximo à banda C–H, bem como pelo pico em 1060 cm^{-1}, que representa ligações O=S=O (Silverstein, 2019).

Figura 5. Espectroscopia no Infravermelho Transformada de Fourier para HDL-SDS (a), HDL-SDSM#1 (b) e HDL-SDSM#2 (c)

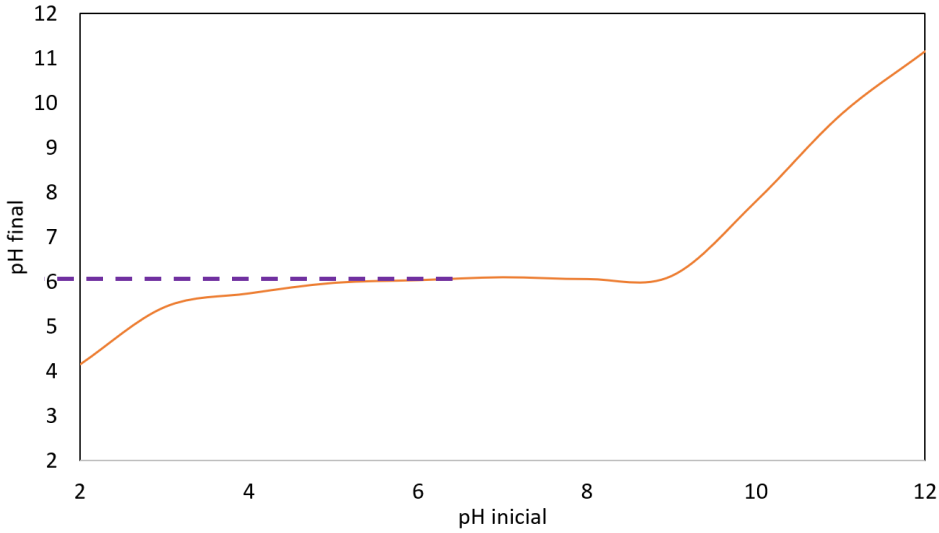


Fonte: Autores, 2026.

Uma atenuação das bandas referente à fração orgânica (SDS) é observada entre os materiais, com as menores intensidades observadas para os HDLs magnéticos. Isso é vinculado à incorporação da magnetita, que absorve mais radiação infravermelha em detrimento das bandas orgânicas. Esse fator corrobora com a menor intensidade observada para HDL-SDSM#2, o material que apresentou coloração cinza mais escura e maior magnetismo, características associadas à presença de Fe_3O_4.

Os ensaios de ponto de carga zero resultaram nos dados dispostos na Figura 6. É possível observar que os pHs finais se estabilizam na faixa de pH 6, indicando ser este pH o correspondente ao seu ponto de carga zero. As variedades magnéticas apresentaram o mesmo resultado, o que sugere que a magnetita, enquanto aditivo, não altera essa propriedade.

Figura 6. Gráfico de ponto de carga zero para o material HDL-SDS



Fonte: Autores, 2026.

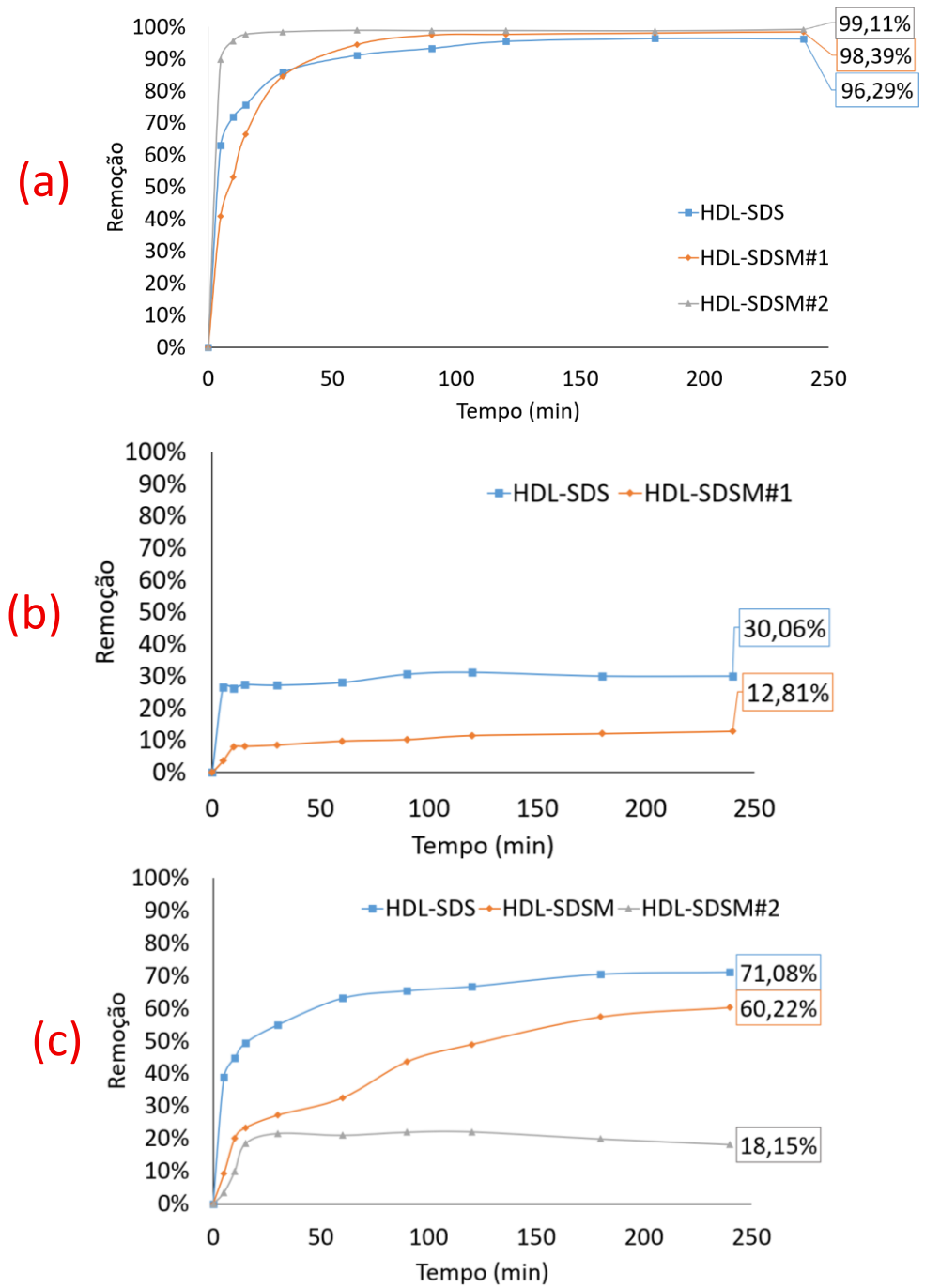
Os resultados referentes aos experimentos adsortivos pertinentes a cada corante utilizado são apresentados na Figura 7.

Testes envolvendo amarelo tartrazina e HDL-SDSM#2 foram omitidos por apresentarem comportamento anômalo, isto é, aumento da absortividade ao longo do tempo de contato. Esta tendência é possivelmente associada à lixiviação de ferro da magnetita superficial para o meio reacional na forma de íons férricos (Fe^{3+}), os quais apresentam, como uma de suas principais características, a coloração amarelo/laranjada quando dissolvidos em solução aquosa (Atkins e Jones, 2013 e Vogel *et al.*, 2002). Isso contribuiria positivamente com a absorção de radiação na região correspondente à coloração amarela no espectro eletromagnético da luz visível e, logo, impossibilitaria o cálculo da capacidade de adsorção do material HDL-SDSM#2.

Para o azul de metileno, todos os três LDHs apresentaram uma remoção superior a 95% nos primeiros 15 minutos, indicando uma adsorção extremamente rápida e eficiente, corroborando com os resultados obtidos por Miranda *et al.* (2015) para um HDL semelhante. A velocidade do processo pode ser atribuída à forte atração eletrostática entre as moléculas de azul de metileno, que é um corante catiônico (ou seja, com carga superficial positiva) e o material hidrofóbico (HDL-SDS). O dodecil sulfato de sódio (SDS) incorporado na estrutura da hidrotalcita e, mais especificamente, na sua região interlamelar, proporciona um aumento de sua apolaridade devido à sua extensa cadeia hidrofóbica, minimizando o caráter positivo da HDL, e favorecendo, por meio de interações de van der Waals, a adsorção do corante (Ruan *et al.*, 2013). Associativamente, o caráter aniônico do grupo sulfato ($R\text{-}O\text{-}SO_3^-$) pode potencializar esse fenômeno, favorecendo ainda mais a atração eletrostática do corante azul de metileno, de características catiônicas. O fato de a remoção ter sido igualmente elevada para todos os três HDLs sugere que a presença de magnetita (mesmo na forma

revestida na superfície) não proporciona impedimentos difusionais do substrato aquoso contendo o corante aos sítios adsortivos do material sintetizado. O tamanho da molécula de azul de metileno, a menor dentre os 3 corantes avaliados, permite sua difusão através da configuração interlamelar, que permanece praticamente inalterada pelas partículas externas de Fe_3O_4.

Figura 7. Cinética de adsorção dos HDLs sintetizados frente aos corantes: (a) azul de metileno, (b) amarelo tartrazina e (c) vermelho 40



Fonte: Autores, 2026.

Frente ao corante amarelo tartrazina, de caraterísticas aniônicas (Figura 7b), o comportamento de adsorção apresentou diferença significativa. Ambos os materiais proporcionaram uma remoção mais lenta, atingindo um platô de estabilidade após 120 minutos de contato. Quanto ao vermelho 40, também de caraterísticas aniônicas (Figura 7c), as tendências de adsorção foram ainda melhores que as do tartrazina. Para ambos os corantes, a incorporação de magnetita proporcionou um efeito negativo da capacidade adsortiva dos materiais sintetizados, conduzindo a menores valores de remoção, mesmo após elevados tempos de contato. Esse resultado conflita com os dados obtidos por Gonçalves *et al.* (2019), que obtiveram melhores resultados com um HDL magnético do que com sua contraparte sem magnetita, atribuindo esses efeitos a um aumento de quantidade e tamanho de poro, acarretando em maior área superficial. Possivelmente, essa tendência é influenciada pelos cátions metálicos (Co/Cr) utilizados para sua síntese, bem como pelo íon interlamelar incorporado (CO_3).

O caráter aniônico dos corantes amarelo tartrazina e vermelho 40, associado à carga negativa do dodecil sulfato, que reduz as forças eletrostáticas encontradas no HDL (Daud *et al.*, 2019), pode proporcionar um efeito repulsivo entre corante-adsorvente, desfavorecendo sua adsorção. Associativamente, suas estruturas moleculares maiores, em relação ao azul de metileno, são mais suscetíveis a impedimentos difusionais, e podem refletir este efeito negativo na redução da capacidade adsortiva.

A Figura 8 apresenta os resultados de remoção dos corantes pelos materiais sintetizados quando submetidos a irradiação UV.

Os resultados demonstraram que a luz UV, quando empregada de forma isolada (fotólise), não é efetiva para a degradação dos corantes, indicando que os mesmos são estáveis frente a essa radiação.

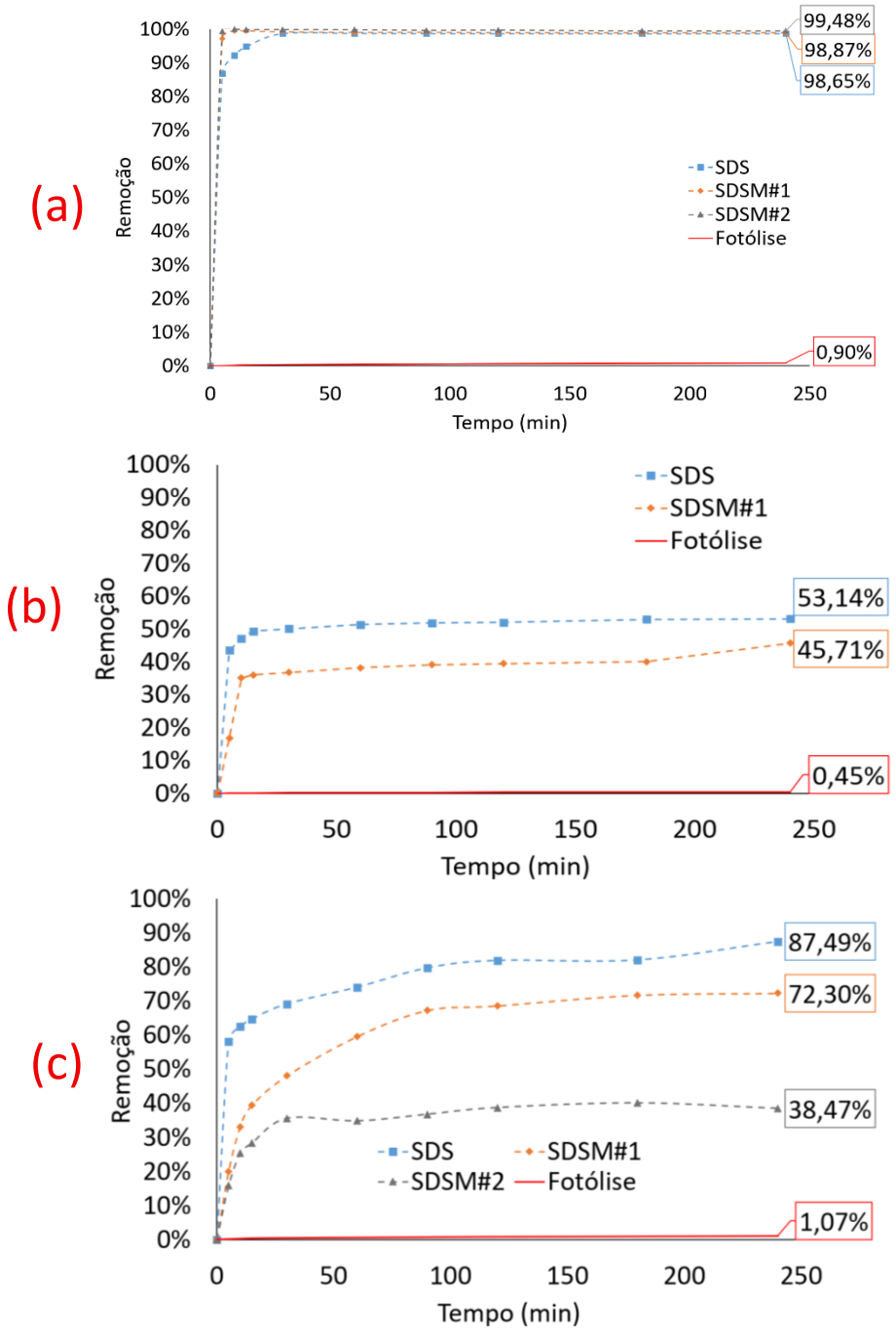
Para o azul de metileno, os experimentos fotocatalíticos demostraram um efeito positivo na cinética reacional, atingindo valores de remoção superiores a 98% com 5 minutos reacionais para as HDL magnéticas, ou seja, em um tempo aproximadamente 10 vezes menor quando comparado aos ensaios conduzidos na ausência de irradiação UV. No entanto, a remoção final após 240 min foi similar àquela observada para os ensaios adsortivos.

Para os corantes amarelo tartrazina e vermelho 40, observa-se a mesma tendência apresentada para os ensaios adsortivos, com a incorporação da magnetita apresentando efeito negativo na capacidade de remoção de cor, ou seja, com a HDL-SDS apresentando as maiores remoções (~53 % para o tartrazina e ~87% para o vermelho 40).

Independentemente do corante aniônico e do material sintetizado empregado nos ensaios fotocatalíticos, a irradiação UV apresentou um efeito positivo na remoção dos corantes, apresentando incrementos entre 11 e 32% na remoção de cor em relação aos valores obtidos nos ensaios adsortivos. Associativamente, principalmente para o

corante vermelho 40, as maiores remoções são obtidas em um tempo reacional mais curto, indicando uma cinética reacional mais favorável na presença de irradiação UV.

Figura 8. Cinética de fotocatálise para os corantes azul de metileno (a), amarelo tartrazina (b) e vermelho 40 (c)



Fonte: Autores, 2026.

Além disto, coerente com a literatura, os resultados sugerem que os materiais sintetizados apresentam atividade fotocatalítica, comportando-se como fotocatalisadores. Denti *et al.* (2025) observaram um aumento da remoção, de 50 para

100%, de cor do corante índigo carmim pela HDL/CO_3 quando a mesma foi submetida à irradiação UV. A capacidade fotocatalítica da HDL também foi relatada por Yang *et al.* (2016) na descoloração de soluções de corantes quando expostas a radiação UV.

Posteriormente foram conduzidos ensaios fotocatalíticos empregando, concomitantemente, peróxido de hidrogênio como agente de oxidação auxiliar. A Tabela 2 apresenta as remoções obtidas após 240 minutos reacionais, bem como os valores correspondentes a seus ensaios homônimos sem peróxido de hidrogênio.

Todos os materiais avaliados (HDL-SDS, HDL-SDSM#1 e HDL-SDSM#2), independentemente do corante, apresentaram um efeito positivo na presença do peróxido, demonstrando maiores remoções superiores (entre 5 e 8%) em relação aos seus ensaios homônimos conduzidos na ausência do oxidante auxiliar, particularmente com os HDLs magnéticos, podendo sugerir interações tipo Fenton entre o peróxido e os íons de ferro.

Esta tendência era esperada, sendo também relatada por outros autores (Denti *et al*, 2023 e 2025) que vincularam este efeito à decomposição radicalar do peróxido de hidrogênio em radicais hidroxila (HO·) adicionais, evidenciando o seu poder oxidante quando submetido a irradiação UV. A geração deste composto radicalar favorece a degradação dos corantes, melhorando a eficiência global de remoção de cor pelo sistema avaliado.

Tabela 2. Remoções (%) observadas para os ensaios fotocatalíticos após 240 minutos de irradiação, na ausência e na presença de H_2O_2

Corante	Fotocatálise			Fotocatálise + H_2O_2		
	SDS	**SDSM#1**	**SDSM#2**	**SDS**	**SDSM#1**	**SDSM#2**
Azul de Metileno	98,65	98,87	98,65	98,75	98,99	99,48
Amarelo Tartrazina	53,14	43,32	-	62,63	45,71	-
Verm. 40	87,49	72,30	38,47	90,09	83,72	43,10

Fonte: Autores, 2026.

Considerações finais

A síntese dos hidróxidos duplos lamelares (HDLs) modificados com o surfactante SDS e incorporados com magnetita foi realizada com sucesso através das

rotas propostas. Conclui-se que o método de precipitação *in situ* da magnetita na superfície (HDL-SDSM#2) é superior para conferir propriedades magnéticas ao material, facilitando sua separação e recuperação do meio aquoso.

Em termos de eficiência ambiental, os materiais mostram-se altamente eficientes na remoção rápida do corante catiônico azul de metileno por via adsortiva. Contrária à hipótese inicial, a presença de magnetita reduz parcialmente a capacidade adsortiva global e a afinidade com corantes aniônicos. Entretanto, a aplicação combinada de irradiação UV e peróxido de hidrogênio combate essa limitação ao ativar o potencial fotocatalítico do HDL. Portanto, o sistema proposto apresenta potencial como uma rota tecnológica promissora e versátil para o tratamento de efluentes industriais contendo contaminantes orgânicos complexos.

REFERÊNCIAS

AMETA, S. C.; AMETA, R. **Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment**. Udaipur: Academic Press, 2018.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 430 de, 13/05/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17/03/2005. Disponível em: https://abrir.link/RRJGU. Acesso em: 17 jun. 2026.

BROWN, K. The Surprising Way Companies Can Shape Environmental Regulations. Z2Data, 2025. Disponível em: https://www.z2data.com/insights/surprising-way-companies-can-shape-environmental-regulations. Acesso em: 12 set. 2025.

BOTELHO, B. G. **Desenvolvimento e validação de métodos para análise direta de alimentos usando ferramentas quimiométricas, espectroscopia no infravermelho e imagens digitais**. 2014. 163 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

BURANGE, A. S.; GOPINATH, C. S. Catalytic applications of hydrotalcite and related materials in multi -component reactions: Concepts, challenges and future scope. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 22, 100458, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100458.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. *E-book*. p.i. ISBN 9788521637325. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/. Acesso em: 22 jun. 2026.

CARDOSO, L. P. **Estudo da Aplicação de Hidróxidos Duplos Lamelares na Remoção e Liberação Lenta de Pesticidas**. 2006. 178 f. Tese de Doutorado – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

CONCEIÇÃO, L. da *et al.* Compósitos magnéticos baseados em hidrotalcitas para a remoção de contaminantes aniônicos em água. **Química Nova**. v. 30, p. 1077-1081, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500005.

DANTAS, E. J. M. *et al.* Cellulose-MIL-88A photocatalytic membrane to treat effluents containing dyes and oil emulsions. **Catalysis Today**. v. 441, 114846, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114846.

DENTI, A. F. **Síntese do compósito HT-TiO2 para aplicação em processos fotocatalíticos heterogêneos**. 2023. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2023.

DENTI, A. F.; BERNARDI, J. L.; PUTON, B. M. S.; BRUEL, G. M.; JUNGES, A.; STEFFENS, J.; DALLAGO, R. M. Synthesis of hydrotalcite and titanium dioxide (HT TiO2) composite for application in heterogeneous photocatalytic processes. **Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry**, v. 459, 116068, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116068.

DAUD, M; HAI, A.; BANAT, F.; WAZIR, M. B.; HABIB, M.; BHARATH, G.; HARTHI, M. A. Al. A review on the recent advances, challenges and future aspect of layered double hydroxides (LDH) – Containing hybrids as promising adsorbents for dyes removal. **Journal of Molecular Liquids**, v. 288, 110989, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110989.

DICIO, Dicionário Online de Português. Poluição. 2026. Disponível em: https://www.dicio.com.br/poluicao/. Acesso em: 22 jun. 2026.

DOTTO, G. L. *et al.* Remoção dos corantes azul brilhante, amarelo crepúsculo e amarelo tartrazina de soluções aquosas utilizando carvão ativado, terra ativada, terra diatomácea, quitina e quitosana: Estudos de equilíbrio e termodinâmica. **Química Nova**, v. 34, p. 1193-1199, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000700017.

FOX, M.; DULAY, M. T. Heterogeneous photocalysis. **Chemical Reviews**, v. 93, n. 1, p. 341-357, 1993. DOI: https://dx.doi.org/10.1021/cr00017a016.

GILBERT, D. Moving Beyond Compliance: Can Industry Get Ahead of the Curve? *In*: **Institute of Medicine (US)**. Global Environmental Health in the 21st Century: From Governmental Regulation to Corporate Social Responsibility: Workshop Summary. Washington: National Academies Press (US), 2007. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK53985/. Acesso em: 24 jun. 2026

GOLOVIN, Sergei N. *et al.* Synthesis and thermal behavior of Co/AlCe layered double hydroxide. **Solid State Sciences**, v. 111, 106498, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2020.106498.

GONÇALVES, R. G. L.; LOPES, P. A.; RESENDE, J. A.; PINTO, F. G.; TRONTO, J.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, L. C. A. de; NUNEZ, W. de C.; NETO, J. L. Performance of magnetite/layered double hydroxide composite for dye removal via adsorption, Fenton and photo-Fenton processes. **Applied Clay Science**, v. 179, 105152, 2019. DOI:

MACRUZ, P.D.; NIPPES, R.P.; JORGE, L.M. de M.; SANTOS, O.A.A. dos. Photocatalytic removal of persistent pollutants using eco-friendly ZnO, **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 104, p. 387-400, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10971-022-05949-z.

MENINO, N. M.; SALLA, J da S.; NASCIMENTO, M. S. do; DALLAGO, R. M.; PERALTA, R. A.; MOREIRA, R. F. P. M. High-performance hydrophobic magnetic hydrotalcite for selective treatment of oily wastewater. **Environmental Technology**, v. 22, p. 1426-1437, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/09593330.2021.2003441.

MIOTTO, N. **Hidrotalcita hidrofóbica e magnética aplicada no tratamento de efluentes oleosos**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MIRANDA, L.D.L.; BELLATO, C. R.; MILAGRES, J. L.; MOURA, L. G.; MOUNTEER, A. H.; ALMEIDA, M. F. de. Hydrotalcite-TiO2 magnetic iron oxide intercalated with the anionic surfactant dodecylsulfate in the photocatalytic degradation of methylene blue dye. **Journal of Environmental Management**, v. 156, p. 225-235, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.051.

OPENAI. ChatGPT. Modelo de linguagem baseado em inteligência artificial. Disponível em: https://chat.openai.com. Acesso em: 02 jun. 2026.

PASQUALI, E. A.; ORO, C. E. D.; BERNARDI, J. L.; GRASS, G. B.; VENQUIARUTO, L. D.; TREICHEL, H.; MOSSI, A. J.; DALLAGO, R. M. Exploring the adsorptive potential of layered double hydroxides for chromium (VI) remediation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, p. 9627–9636, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13762-024-06239-7.

RUAN, X., HUANG, S., CHEN, H., QIAN, G. Sorption of aqueous organic contaminants onto dodecyl sulfate intercalated magnesium iron layered double hydroxide. **Applied Clay Science**, v.72, p. 96-103, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.01.001.

SANTOS, J. E. G. dos; ARAÚJO, J. A. S. de; BRITO, A. dos S.; GONÇALVES, M. V.; GONÇALVES, L. S. V.; TEIXEIRA, R. N. P.; BOTERO, W. G. UMA REVISÃO NARRATIVA SOBRE A POLUIÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E CARACTERIZAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS. **Revista de Geopolítica**, v. 17, n. 2, p. 1-19, 2026. DOI: https://doi.org/10.56238/revgeov17n2-023.

VOGEL, A. I. *et al.* Análise **Química Quantitativa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. E-book. p.i. ISBN 978-85-216-2580-3. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2580-3/. Acesso em: 23 jun. 2026.

XIA, S.; LIU, F; NI, Z.; SHI, W.; XUE, J.; QIAN, P. Ti-based layered double hydroxides: Efficient photocatalysts for azo dyes degradation under visible light. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 144, p. 570-579, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.07.060.

YANG, Z.; WANG, F.; ZHANG, C.; ZENG, G.; TAN, X.; YU, Z.; ZHONG, Y.; WANG, H.; CUI, F. Utilization of LDH-based materials as potential adsorbents and photocatalysts for the decontamination of dyes wastewater: a review. **RSC Advances**, v. 28, n. 6, p 79415-79436. DOI: https://doi.org/10.1039/C6RA12727D.

ZHANG, Z.; SUN, Z.; YUAN, T. Recent Advances in the Catalytic Upgrading of Biomass Platform Chemicals Via Hydrotalcite Derived Metal Catalysts. **Transactions of Tianjin University**, v. 28, p. 89-111, 2022.

ZU, J. *et al.* In situ synthesis of surfactant/silane-modified hydrotalcites. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 319, p. 498-504, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.11.037.



EDIFAPES