

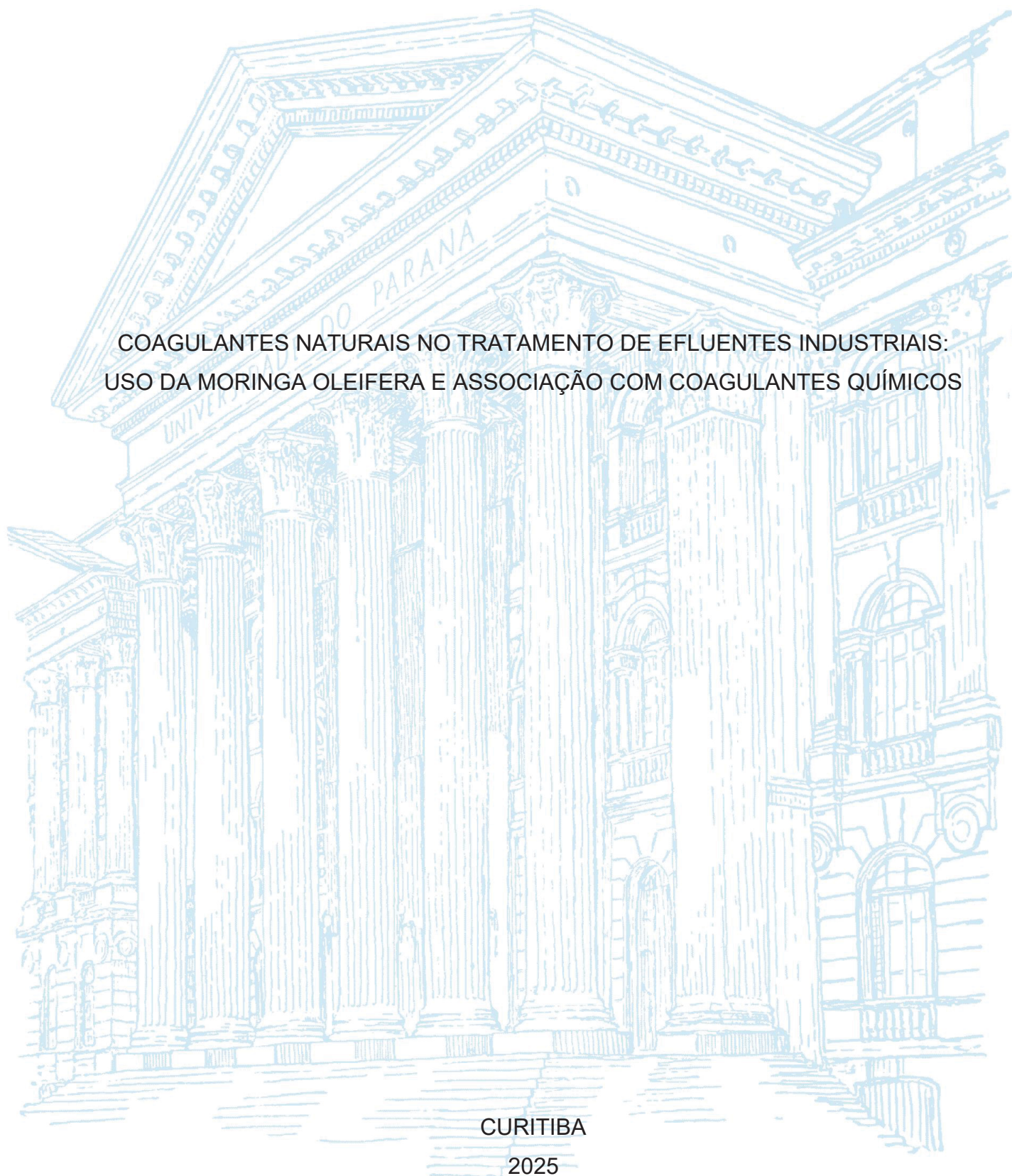
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JONAS RAUL BALBINOTI

COAGULANTES NATURAIS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS:
USO DA MORINGA OLEIFERA E ASSOCIAÇÃO COM COAGULANTES QUÍMICOS

CURITIBA

2025



JONAS RAUL BALBINOTI

COAGULANTES NATURAIS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS:
USO DA MORINGA OLEIFERA E ASSOCIAÇÃO COM COAGULANTES QUÍMICOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a Dr^a Regina Maria Matos Jorge.

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Balbinoti, Jonas Raul

Coagulantes naturais no tratamento de efluentes industriais: uso da Moringa oleifera e associação com coagulantes químicos / Jonas Raul Balbinoti. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Regina Maria Matos Jorge

1. Coagulação. 2. Água – Tratamento. 3. Sustentabilidade. 4. Moringa oleifera. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Jorge, Regina Maria Matos. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JONAS RAUL BALBINOTI**, intitulada: **Coagulantes Naturais no Tratamento de Efluentes industriais: uso da Moringa oleifera e associação com Coagulantes Químicos**, sob orientação da Profa. Dra. REGINA MARIA MATOS JORGE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Abril de 2025.

Assinatura Eletrônica

11/04/2025 09:36:04.0

REGINA MARIA MATOS JORGE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

11/04/2025 09:33:58.0

SUELEN AVILA BERTHIER

Avaliador Externo (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ALIMENTAÇÃO E NUTRIÇÃO - UFPR)

Assinatura Eletrônica

11/04/2025 11:36:22.0

ARION ZANDONÁ FILHO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/04/2025 19:34:12.0

DAVID CHACÓN ALVAREZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica

11/04/2025 11:27:44.0

CRISTIANE VIEIRA HELM

Avaliador Externo (EMBRAPA FLORESTAS)

Dedico este trabalho a minha filha Iara,
minha esposa Thaisa e meus pais Luzia e Paulino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada, fundamentais para a realização deste trabalho.

À minha orientadora, Profa. Regina, minha gratidão por sua paciência, dedicação e por acreditar no potencial desta pesquisa. Sua orientação foi essencial não apenas para a construção técnica deste trabalho, mas também para o meu crescimento como pesquisador. Agradeço por compartilhar seus conhecimentos e por me inspirar a trilhar caminhos desafiadores.

À minha esposa Thaisa, meu porto seguro e minha maior motivadora, agradeço por seu amor, compreensão e por todo o apoio durante os momentos mais difíceis desta jornada. Sua presença foi fundamental para que eu não desistisse. À minha filha Iara, o brilho dos meus dias, agradeço por me lembrar, com sua alegria e doçura, do que realmente importa. Vocês são, sem dúvida, a maior força motriz por trás desta conquista.

Aos colegas e amigos dos diversos laboratórios que me acolheram ao longo do desenvolvimento desta tese, meu muito obrigado. A troca de ideias, os conselhos e as colaborações que surgiram nesses ambientes foram determinantes para o aprimoramento deste trabalho.

Ao SESI/MS, deixo um agradecimento especial por me permitir conciliar as atividades do doutorado com as minhas responsabilidades profissionais. Essa flexibilidade me proporcionou uma experiência única ao poder visualizar a aplicação prática e real das soluções propostas nesta pesquisa, ampliando sua relevância e impacto.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este momento se tornasse realidade, meu sincero muito obrigado.

“O insignificante para muitos pode ser o início de algo imensurável para a
ciência.”

Marie Curie

RESUMO

O tratamento sustentável de efluentes industriais é um desafio crescente, especialmente devido à poluição gerada pela expansão de atividades econômicas, como a indústria alimentícia. O uso de coagulantes naturais à base de plantas, como a *Moringa oleifera*, surge como alternativa promissora frente aos coagulantes químicos tradicionais, por apresentar menor toxicidade, biodegradabilidade superior e produção reduzida de lodo. Esta tese busca explorar e otimizar a aplicação de coagulantes naturais, investigando tanto seu desempenho isolado quanto combinado com coagulantes químicos em diferentes cenários de tratamento de efluentes. No **Capítulo 1**, é apresentada uma revisão abrangente da literatura sobre o uso de coagulantes naturais, com foco nos mecanismos de ação, fatores que influenciam seu desempenho e benefícios ambientais e econômicos. Destaca-se a importância da *M. oleifera* devido às suas proteínas catiônicas, além de explorar outros coagulantes, como taninos e amidos. O capítulo discute as limitações práticas desses coagulantes e apresenta perspectivas futuras para sua adoção em larga escala, incluindo associações com coagulantes químicos. O **Capítulo 2** trata dos ensaios experimentais realizados com água de baixa turbidez, utilizando a *M. oleifera* em combinação com o Policloreto de Alumínio (PAC). Os testes laboratoriais analisaram a remoção de turbidez, cor e a redução do residual de alumínio, além de parâmetros físico-químicos como pH e condutividade elétrica. Os resultados indicaram que a associação dos coagulantes proporciona maior eficiência na remoção de partículas suspensas, com menor carga residual de alumínio, demonstrando ser uma solução viável para sistemas de tratamento. No **Capítulo 3**, a investigação é direcionada ao tratamento de efluentes da parboilização do arroz, um resíduo industrial com grande carga orgânica. A combinação entre *M. oleifera* e PAC foi testada sob diferentes condições operacionais de dosagem e pH. O estudo avaliou a remoção de turbidez, matéria orgânica e coliformes, demonstrando que a associação dos coagulantes foi eficaz na melhoria da qualidade do efluente tratado, com potencial para reutilização ou descarte seguro. Concluiu-se que os coagulantes naturais, especialmente quando utilizados em combinação com coagulantes químicos, apresentam grande potencial para reduzir os impactos ambientais das atividades industriais. A abordagem proposta oferece uma alternativa sustentável e de baixo custo, contribuindo para a transição de processos convencionais para práticas mais ecológicas. O estudo estabelece diretrizes para futuras pesquisas e aplicações práticas, promovendo tecnologias verdes em setores industriais variados.

Palavras-chave: Coagulação. Tecnologias ambientais. Sustentabilidade. Tratamento de água.

ABSTRACT

The sustainable treatment of industrial effluents is a growing challenge, especially due to the pollution generated by the expansion of economic activities, such as the food industry. The use of natural plant-based coagulants, such as *Moringa oleifera*, emerges as a promising alternative to traditional chemical coagulants, due to their lower toxicity, better biodegradability and reduced sludge production. This thesis aims to explore and optimize the application of natural coagulants, investigating both their performance alone and in combination with chemical coagulants in different effluent treatment scenarios. Chapter 1 presents a comprehensive review of the literature on the use of natural coagulants, focusing on the mechanisms of action, factors that influence their performance and environmental and economic benefits. The importance of *Moringa oleifera* is highlighted due to its cationic proteins, in addition to exploring other coagulants, such as tannins and starches. The chapter discusses the practical limitations of these coagulants and presents future perspectives for their large-scale adoption, including associations with chemical coagulants. Chapter 2 deals with the experimental tests carried out with low turbidity water, using *Moringa oleifera* in combination with Polyaluminum Chloride (PAC). The laboratory tests analyzed the removal of turbidity, color and reduction of aluminum residue, in addition to physical-chemical parameters such as pH and electrical conductivity. The results indicated that the combination of coagulants provides greater efficiency in the removal of suspended particles, with a lower residual aluminum load, demonstrating that it is a viable solution for treatment systems. In Chapter 3, the investigation is directed to the treatment of effluents from rice parboiling, an industrial waste with a high organic load. The combination of *Moringa oleifera* and PAC was tested under different operating conditions of dosage and pH. The study evaluated the removal of turbidity, organic matter and coliforms, demonstrating that the combination of coagulants was effective in improving the quality of the treated effluent, with potential for reuse or safe disposal. It was concluded that natural coagulants, especially when used in combination with chemical coagulants, have great potential to reduce the environmental impacts of industrial activities. The proposed approach offers a sustainable and low-cost alternative, contributing to the transition from conventional processes to more environmentally friendly practices. The study establishes guidelines for future research and practical applications, promoting green technologies in various industrial sectors.

Keywords: Coagulation. Environmental Technologies. Sustainability. Water treatment.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

FIGURA 1.1 - REPRESENTAÇÃO DOS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.....	25
FIGURA 1.2 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE MISTURA NAS ETAPAS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	27
FIGURA 1.3 - REPRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO JAR TEST UTILIZADO PARA OS TESTES DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.	34
FIGURA 1.4 - PRINCIPAIS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE COAGULANTES NATURAIS.....	49
FIGURA 1.5 - VANTAGENS DOS COAGULANTES NATURAIS SOBRE OS COAGULANTES QUÍMICOS.....	57
FIGURA 1.6 - CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	57

CAPÍTULO 2 – TRATAMENTO DE ÁGUA COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO MORINGA OLEIFERA LAM E CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC)

FIGURA 2.1 - TURBIDEZ RESIDUAL EM DIFERENTES PROPORÇÕES DE MO:PAC.....	76
FIGURA 2.2 - COR RESIDUAL EM DIFERENTES PROPORÇÕES DE MO:PAC PARA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE TURBIDEZ.....	78
FIGURA 2.3 - RESIDUAIS COM ABSORBÂNCIA EM UV _{254nm} PARA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE TURBIDEZ EM DIFERENTES PROPORÇÕES DE MO:PAC.	82
FIGURA 2.4 - ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E EMISSÃO POR ELM PARA CARACTERIZAR O TIPO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE NA ÁGUA.....	84

FIGURA 2.4 (continuação) - ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E EMISSÃO POR ELM PARA CARACTERIZAR O TIPO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE NA ÁGUA.....	85
FIGURA 2.4 (continuação) - ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E EMISSÃO POR ELM PARA CARACTERIZAR O TIPO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE NA ÁGUA.....	86

CAPÍTULO 3 - COMBINAÇÃO DE COAGULANTES NATURAIS E SINTÉTICOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE PARBOILIZAÇÃO

FIGURA 3.1 - REMOÇÃO DE TURBIDEZ NAS ASSOCIAÇÕES M. <i>OLEIFERA</i> :PAC.	95
FIGURA 3.2 - REMOÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS NAS ASSOCIAÇÕES M. <i>OLEIFERA</i> :PAC.	97
FIGURA 3.3 - pH DO EFLUENTE TRATADO NAS ASSOCIAÇÕES M. <i>OLEIFERA</i> :PAC.	98
FIGURA 3.4 – CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO E TRATADO.	99

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

TABELA 1.1 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS UTILIZADAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA EMPREGANDO COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL.	29
TABELA 1.2 - USO DE COAGULANTES A BASE DE PLANTATA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.	37
TABELA 1.3 - COAGULANTES NATURAIS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.	52

CAPÍTULO 2 – TRATAMENTO DE ÁGUA COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO MORINGA OLEIFERA LAM E CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC)

TABELA 2.1 - CONDIÇÕES DE TRATAMENTO.	73
TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE TURBIDEZ ANTES E DEPOIS DOS TRATAMENTOS.	80

CAPÍTULO 3 - COMBINAÇÃO DE COAGULANTES NATURAIS E SINTÉTICOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE PARBOILIZAÇÃO

TABELA 3.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO EFLUENTE ANTES E APÓS TRATAMENTOS COM MO E PAC.	100
TABELA 3.2 - CONTAGEM DE MICRORGANISMOS NO EFLUENTE TRATADOS COM MO E PAC.	104

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABS UV_{254nm} - Absorbância a 254 nanômetros no ultravioleta

Al₂(SO₄)₃ - Sulfato de alumínio

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

Al³⁺ - Íon alumínio

AlCl₃ - Cloreto de alumínio

ANOVA – Análise de variância

CaCl₂ - Cloreto de cálcio

CF - Coagulação e floculação

CFS - Coagulação/floculação/sedimentação

CFS - Coagulação/floculação/sedimentação

COD – Carbono orgânico dissolvido

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DNA – Ácido desoxirribonucleico

DQO - Demanda química de oxigênio

EEM - Matrizes de excitação-emissão

ELM - Espectrometria de luminescência molecular

ETA – Estação de tratamento de água

ETE - Estação de tratamento de efluente

FAD – Flotação por ar dissolvido

Fe₂(SO₄)₃ - Sulfato férrico

FeCl₃ - Cloreto férrico

g – Grama

g.L⁻¹ – Grama por litro

kDa - Quilodalton

KNO₃ - Nitrato de potássio

L – Litro

M – Molar

m/v – Massa por volume

MF – Microfiltração

MF – Microfiltração

Mg.L⁻¹ – Miligrama por litro

min – Minuto

mL – mililitro

MO – Moringa oleífera

MOD – Matéria orgânica dissolvida

MON – Matéria orgânica natural

mS.cm⁻¹ - Milissiêmen por centímetro

N – Nitrogênio Amônia.

NaCl - Cloreto de sódio

NF – Nanofiltração

NF – Nanofiltração

NH₄Cl - Cloreto de amônio

°C – Graus celsius

ODS – Objetivos de desenvolvimento sustentável

P – Fósforo total

p.p⁻¹ – Partículas por milhão

PAC – Policloreto de alumínio

pH – Potencial hidrogeniônico

Pt/Co – Escala platina-cobalto

RPM – Rotações por minuto

s - Segundo

SDT - Sólidos dissolvidos totais

SS – Sólidos sedimentáveis

SST - Sólidos suspensos totais

ST - Sólidos totais

UFC.mL⁻¹ – Unidades formadoras de colônias por mililitro

uT – Unidade de turbidez

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
OBJETIVO GERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
 CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA	21
1.1 INTRODUÇÃO	22
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS	24
1.3 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO	25
1.4 COAGULANTES.....	34
1.4.1 COAGULANTES SINTÉTICOS	34
1.4.2 COAGULANTES NATURAIS À BASE DE PLANTAS	35
1.4.3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL	41
1.4.3.1 Dosagem	41
1.4.3.2 pH.....	42
1.4.3.3 Temperatura	43
1.4.3.4 Mistura.....	44
1.4.4 COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL X COAGULANTES QUÍMICOS	44
1.4.5 ASSOCIAÇÃO ENTRE COAGULANTES NATURAIS E INORGÂNICOS	46
1.4.6 PRINCÍPIO ATIVO ENVOLVIDO NA COAGULAÇÃO COM AGENTES NATURAIS	47
1.4.7 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE COAGULANTES NATURAIS.....	48
1.4.8 MECANISMOS DE COAGULAÇÃO EM COAGULANTES NATURAIS	55
1.4.9 BENEFÍCIOS DO USO DE COAGULANTES NATURAIS.....	56
1.4.10 ASPECTOS ECONÔMICOS DE COAGULANTES NATURAIS A BASE DE PLANTAS	58
1.4.11 AVANÇOS RECENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS PARA COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL NO TRATAMENTO DE ÁGUA	60
1.4.11.1 Plantas com capacidade de coagulação além da <i>Moringa oleifera</i>	60
1.4.12 PROCESSO INTEGRADO DE TRATAMENTO	61
1.4.13 MELHORIA NA EXTRAÇÃO E PURIFICAÇÃO DE COAGULANTES NATURAIS	62

1.4.14 MODIFICAÇÃO NOS COAGULANTES NATURAIS PARA MELHOR DESEMPENHO	63
1.4.15 VIABILIDADE DOS COAGULANTES NATURAIS	64
1.4.16 SUSTENTABILIDADE DOS COAGULANTES NATURAIS	65
1.4.17 CONCLUSÕES	65

CAPÍTULO 2 – TRATAMENTO DE ÁGUA COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO MORINGA OLEIFERA LAM E CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC)

2.1 INTRODUÇÃO	68
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS	72
2.2.1 ÁGUA DE ESTUDO	72
2.2.2 PREPARO DOS COAGULANTES	72
2.2.3 TESTES EXPERIMENTAIS	72
2.2.4 EFICÁCIA DO TRATAMENTO	74
2.2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	74
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
2.3.1 TURBIDEZ	75
2.3.2 COR	77
2.3.3 PH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E RESIDUAL DE ALUMÍNIO	79
2.3.4 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA	81
2.4 CONCLUSÕES	87

CAPÍTULO 3 – COMBINAÇÃO DE COAGULANTES NATURAIS E SINTÉTICOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE PARBOILIZAÇÃO

RESUMO.....	90
3.1 INTRODUÇÃO	90
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	92
3.2.1 EFLUENTE DE ESTUDO	92
3.2.2 PREPARO DOS COAGULANTES NATURAL E QUÍMICO	92
3.2.3 TESTES EXPERIMENTAIS	93
3.2.4 EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO	93
3.2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	94
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
3.3.1 ASSOCIAÇÕES M. <i>OLEIFERA</i> :PAC NO TRATAMENTO DO EFLUENTE	94

3.3.1.1 Remoção de turbidez	94
3.3.1.2 Remoção de Matéria Orgânica.....	96
3.3.1.3 pH.....	97
3.3.3.2. Desempenho do Tratamento com 100% M. <i>oleifera</i> e 100% PAC.....	99
3.3.3.3. Análise Microbiológica do Efluente Tratado com M. <i>oleifera</i> e PAC.....	103
3.4 CONCLUSÕES	104
CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
REFERÊNCIAS.....	107

INTRODUÇÃO

O rápido avanço industrial e a expansão das atividades econômicas, particularmente na indústria alimentícia, têm gerado um aumento significativo na produção de efluentes líquidos contaminantes. A gestão sustentável desses efluentes é fundamental, pois o descarte inadequado pode causar graves impactos ao meio ambiente, como a poluição de corpos d'água, proliferação de organismos nocivos e contaminação do solo. Tradicionalmente, a coagulação e floculação (CF) são etapas cruciais no tratamento de águas residuais, utilizando-se amplamente coagulantes químicos, como sais de ferro e alumínio, devido à sua eficiência e baixo custo inicial. Entretanto, esses produtos apresentam desvantagens significativas, como a geração de resíduos tóxicos e a possibilidade de contaminação por alumínio residual, o que impulsiona a busca por alternativas mais sustentáveis e menos impactantes.

Nesse contexto, os coagulantes naturais à base de plantas têm emergido como uma alternativa promissora. Sua biodegradabilidade, menor toxicidade e custo reduzido, aliados à menor produção de lodo, são fatores que favorecem sua aplicação em larga escala. Dentre os coagulantes naturais, a *M. oleífera* se destaca como um dos mais estudados. Essa planta é originária do noroeste da Índia, pertencente à família Moringaceae. É uma árvore de crescimento rápido, resistente à seca, com folhas compostas, flores brancas e vagens longas que contêm sementes oleaginosas. Suas sementes possuem propriedades notáveis, sendo tradicionalmente utilizadas como coagulantes naturais na purificação da água, graças à presença de proteínas catiônicas que ajudam a aglutinar impurezas e bactérias. Além de suas sementes, a planta é amplamente valorizada por seu alto teor nutricional, com folhas ricas em vitaminas, minerais e antioxidantes. Adaptável a diversas regiões tropicais e subtropicais, a moringa tem sido cada vez mais estudada por seu potencial em aplicações ambientais, alimentares e farmacológicas. Outros coagulantes vegetais, como taninos, amidos e mucilagens, também apresentam potencial significativo.

A presente tese visa contribuir para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de tratamento de efluentes, focando na substituição parcial ou total de coagulantes químicos por alternativas naturais. Para isso, esta tese é estruturada em três capítulos inter-relacionados, cada um abordando um aspecto específico do

tema: desde a revisão teórica, passando por experimentações com água de baixa turbidez até aplicações em efluentes complexos, como os da parboilização do arroz.

No Capítulo 1, é realizada uma revisão abrangente da literatura sobre o uso de coagulantes de origem vegetal no tratamento de efluentes industriais, com ênfase nas suas propriedades químicas, métodos de extração, mecanismos de ação e fatores que influenciam seu desempenho. O capítulo discute também os benefícios econômicos e ambientais da substituição dos coagulantes químicos pelos naturais, as limitações enfrentadas em aplicações práticas e as perspectivas futuras para a adoção em larga escala. Além disso, é apresentado um panorama sobre a associação entre coagulantes naturais e sintéticos, destacando o papel de cada tipo na potencialização da eficiência de remoção de contaminantes.

No Capítulo 2, são descritos os ensaios experimentais realizados utilizando a combinação de *M. oleifera* e Policloreto de Alumínio (PAC) para o tratamento de águas de baixa turbidez. Os testes foram conduzidos em laboratório, com o intuito de avaliar parâmetros como turbidez, cor, pH, condutividade elétrica e o residual de alumínio. O capítulo explora as potencialidades da associação entre coagulantes naturais e químicos, com o objetivo de otimizar a remoção de partículas suspensas e reduzir os níveis de turbidez, ao mesmo tempo em que busca minimizar a carga residual de alumínio e garantir a eficácia do processo.

O Capítulo 3 aborda o tratamento de efluentes complexos provenientes da parboilização do arroz, uma atividade industrial caracterizada pela geração de grandes volumes de águas residuais altamente contaminadas. Neste capítulo, é estudada a aplicação combinada de *M. oleifera* e cloreto de polialumínio, com foco na avaliação de parâmetros como a remoção de turbidez, matéria orgânica, coliformes e resíduos químicos. O capítulo discute as potencialidades dessa combinação de coagulantes no tratamento desses efluentes, abordando também as condições ideais de dosagem e pH, além dos mecanismos envolvidos na interação entre os coagulantes e as partículas presentes no efluente, com vistas à melhoria da qualidade do efluente tratado para futuras reutilizações ou descarte seguro.

A relevância desta tese está na contribuição direta para a redução do impacto ambiental das atividades industriais, propondo uma alternativa viável para o tratamento sustentável de efluentes. Ao integrar tecnologias verdes e soluções eficientes, este estudo busca oferecer diretrizes práticas e cientificamente embasadas para a implementação de processos de coagulação em larga escala.

Essa abordagem tem o potencial de beneficiar não apenas a indústria alimentícia, mas também outros setores industriais, ao mitigar riscos ambientais e reduzir os custos associados ao tratamento de efluentes.

OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi investigar o uso de coagulantes naturais à base de plantas no tratamento de efluentes industriais provenientes da indústria alimentícia. Além disso, buscou-se desenvolver e avaliar a aplicação da *M. oleifera* (coagulante natural) e sua combinação com Policloreto de Alumínio (PAC) (coagulante sintético) no tratamento de águas de baixa turbidez e efluentes industriais, com ênfase na sustentabilidade, eficiência na remoção de contaminantes e viabilidade de aplicação em larga escala.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Capítulo 1: revisar a literatura científica sobre coagulantes naturais de origem vegetal, destacando seus mecanismos de ação, fatores que influenciam seu desempenho, benefícios econômicos e ambientais, bem como os desafios e as perspectivas de sua adoção em larga escala.

Capítulo 2: investigar o desempenho da *M. oleifera* associada ao PAC no tratamento de águas de baixa turbidez, analisando parâmetros como remoção de turbidez, cor e redução do residual de alumínio, com o objetivo de estabelecer condições operacionais otimizadas.

Capítulo 3: avaliar a efetividade da associação de *M. oleifera* com PAC no tratamento do efluente da parboilização de arroz, por meio da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, como a remoção de matéria orgânica, coliformes totais e turbidez, visando à definição de condições de tratamento eficientes e ambientalmente sustentáveis.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

O conteúdo deste capítulo foi publicado na Revista *Journal of Water Process Engineering* (<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103525>) - Fator de Impacto 6.3

RESUMO

o emprego de tratamentos sustentáveis de efluentes são ferramentas essenciais para reduzir o impacto ambiental das atividades industriais. A substituição parcial ou completa de coagulantes sintéticos por coagulantes naturais, especialmente os de origem vegetal, pode reduzir os impactos ambientais no tratamento de efluentes devido à maior biodegradabilidade e não toxicidade destes coagulantes. Os coagulantes naturais também são geralmente mais baratos. Este artigo retrata acerca dos coagulantes de origem vegetal usados no tratamento de águas residuais da indústria alimentícia. Parâmetros de extração de coagulantes de origem vegetal e condições de tratamento de efluentes para diferentes coagulantes são apresentados. Foi realizada avaliação de artigos que retratam sobre o tratamento de águas residuais da indústria alimentícia, sendo a partir destes analisados o desempenho dos coagulantes de origem vegetal e comparado ao dos coagulantes tradicionais sintéticos, tanto isolados quanto como auxiliares de coagulação. Esta revisão tem como objetivo orientar pesquisadores e profissionais da indústria na otimização e ampliação de tratamentos de águas residuais de modo sustentável, utilizando para tal coagulantes naturais.

1.1 INTRODUÇÃO

As atividades industriais são uma das principais causas da poluição da água devido à geração de quantidades significativas de águas residuais que contêm compostos de difícil degradação (Garcia et al., 2006). A produção de efluentes pela indústria alimentícia é considerável, especialmente no setor de alimentos de origem animal. As operações de abate e processamento de carne geram grandes volumes de efluentes contendo proteínas, compostos orgânicos e gorduras (Olvera et al., 2012). Por exemplo, o abate de um animal bovino gera 700 L de águas residuais (Aguilar et al., 2003; Hosseiny et al., 2012; Real-Olvera et al., 2015). Embora em volume menor do que o setor animal, a produção de alimentos derivados de plantas também usa quantidades significativas de água. Por exemplo, a produção de uma tonelada de óleo de palma bruto requer 5–7,5 toneladas de água (Shak e Wu, 2014; Shak e Wu, 2015); já na indústria de amido de mandioca, são gerados 12–15 L de águas residuais para cada m³ de mandioca processada. Os efluentes gerados na produção de amido de mandioca apresentam alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST), sólidos totais (ST) e cianetos (Suhartini et al., 2013).

O descarte inadequado de efluentes da indústria alimentícia impacta o meio ambiente devido à alta carga de matéria orgânica, alcalinidade, metais pesados,

geração de odores, proliferação de algas e mortalidade de animais (Real-Olvera et al., 2015; Vieira et al., 2010). O tratamento de efluentes industriais é realizado por Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's) (Khayet et al., 2011). Ao reduzir a carga poluente de efluentes, as ETE's permitem sua reutilização segura ou liberação em corpos d'água.

As ETE's utilizam coagulação, floculação, sedimentação e outros processos físicos, químicos e biológicos (Da Costa et al., 2016). Os tratamentos de efluentes podem ser classificados em físicos (filtro, decantação, adsorção, membrana, radiação ultravioleta, etc.), químicos (redução catalítica, coagulação, oxidação, troca iônica, desinfecção, etc.) e biológicos (biodegradação microbiana, fitorremediação, biorreator, etc.) (Ang e Mohammad, 2019; Ang e Mohammad, 2020). Entre essas tecnologias, a coagulação e a floculação (CF) são as mais empregadas no tratamento de águas residuais devido à sua simplicidade, eficiência de custo, eficácia e baixa demanda de energia (Oladoja, 2015).

A coagulação condiz com a adição de um agente coagulante ao efluente para reduzir as forças que mantêm as partículas suspensas separadas dos coloides. A floculação aglomera estas pequenas partículas, formando assim partículas maiores que podem ser facilmente separadas após a sedimentação (Ang e Mohammad, 2020; Jiang, 2015). No tratamento de águas residuais, a CF tem sido utilizada como um pré-tratamento para remover impurezas suspensas e melhorar a qualidade do efluente tratado para os estágios subsequentes (Jiang, 2015). As operações de CF também são empregadas para remover compostos diferentes de partículas suspensas e coloides, como pigmentos, micropoluentes, compostos orgânicos, óleos e gorduras (Oladoja, 2015).

Devido ao papel crucial da CF em garantir a disposição segura de águas residuais, o mercado global de coagulantes e floculantes é estimado em atingir US\$ 6,01 bilhões até 2022, considerando uma taxa de crescimento anual de 5,9 % entre 2017 e 2022 (Markets and Markets, 2021). A relevância econômica da CF justifica o estudo de coagulantes de origem vegetal como substitutos sustentáveis para outros coagulantes comumente utilizados – principalmente aqueles de base química (Ang e Mohammad, 2020). Os coagulantes naturais apresentam maior biodegradabilidade, menor custo e menor toxicidade e geram menos lodo (Vieira et al., 2010; Bhuptawat et al., 2007; Kansal e Kumari, 2014). Dada a amplificação alarmante das crises

climáticas e ecológicas, estudos que avaliam a aplicação de coagulantes naturais tem relevância industrial ao promover tratamentos de efluentes mais sustentáveis.

Os estudos sobre coagulantes naturais são focados principalmente no tratamento de água potável (Pritchard et al., 2010; Choy et al., 2014). No entanto, estudos que exploram a aplicação em efluentes industriais, principalmente da indústria alimentícia, têm crescido nos últimos anos. Neste contexto, Vieira et al. (2010) e Real-Olvera (2015) investigaram *M. oleifera* como coagulante no tratamento de águas residuais da indústria de laticínios e matadouros, respectivamente. Vieira et al. (2010) detectaram uma remoção de 90% de cor e turbidez; Real-Olvera et al. (2015) obtiveram uma redução de 64% em DQO. Diversos outros estudos de pesquisa sobre o desempenho de coagulantes à base de plantas para tratar efluentes da indústria alimentícia serão discutidos nas seções a seguir.

Este artigo de revisão fornece um banco de dados para profissionais e cientistas da indústria interessados em aplicar coagulantes à base de plantas no tratamento de efluentes industriais na indústria alimentícia.

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma revisão da literatura com o intuito de explorar e focar no tema dos coagulantes vegetais empregados no processo de coagulação de efluentes industriais na indústria alimentícia. A pesquisa teve como principal fonte os artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais.

A busca pelos materiais ocorreu em diferentes bases de dados, como Periódicos Capes, SciELO, ScienceDirect e WorldWideScience. Para as pesquisas, foram adotadas as seguintes expressões (em português e inglês): coagulantes naturais à base de plantas; coagulantes vegetais; combinação de coagulantes naturais e inorgânicos; plantas com propriedades coagulantes, além da *M. oleifera*.

Os critérios de inclusão para os estudos selecionados foram: a aplicação de coagulantes vegetais no tratamento de efluentes da indústria alimentícia, considerando aspectos como: fatores que afetam seu desempenho, princípio ativo envolvido, técnicas de processamento, mecanismos de coagulação, vantagens do uso, aspectos econômicos, perspectivas futuras, processos de tratamento integrados, viabilidade e sustentabilidade. Também foram contempladas pesquisas

comparativas, como aquelas que analisavam a utilização de coagulantes vegetais em comparação aos coagulantes químicos.

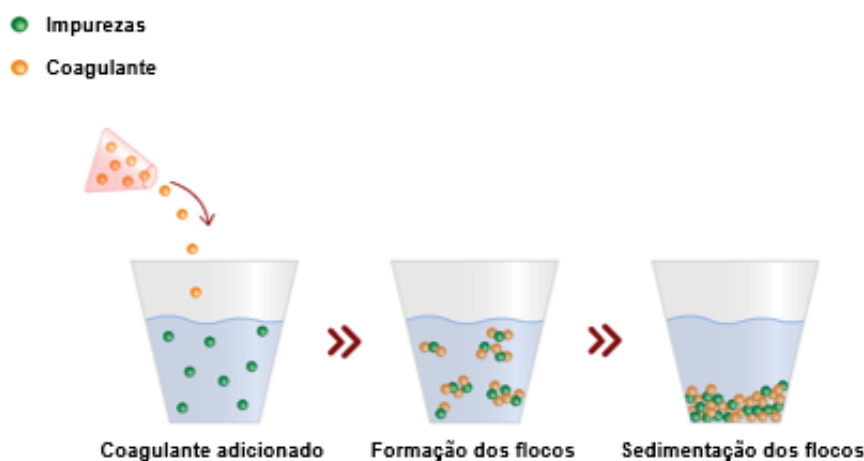
Os estudos que não atenderam aos critérios estabelecidos foram descartados da revisão.

1.3 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

Como as partículas coloidais presentes nos efluentes apresentam baixa velocidade de sedimentação, as ETSS utilizam CF para remover materiais suspensos e dissolvidos (Di Bernardo e Dantas, 2005).

O emprego de coagulantes reduz a turbidez e a cor das águas residuais (Vieira et al., 2010). A turbidez, por exemplo, é reduzida em 85–99% (Jodi et al., 2012). O processo de CF aglutina as impurezas do efluente em partículas maiores e mais pesadas (chamadas flocos), que podem ser removidos por sedimentação, filtração ou flotação (Yin, 2010) (Fig. 1.1).

FIGURA 1.1 - REPRESENTAÇÃO DOS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.



FONTE: O autor (2025).

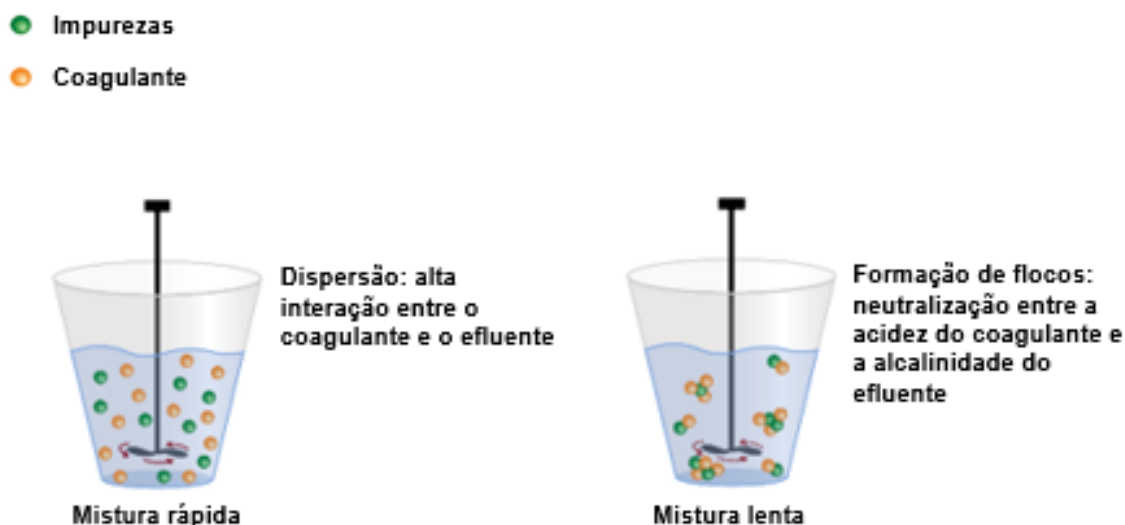
A coagulação é um processo que interfere nas forças físicas e reações químicas entre o efluente e as impurezas dissolvidas. O agente coagulante gera íons carregados positivamente na água, que contém coloides carregados negativamente (Di Bernardo e Dantas, 2005). Desta forma, a repulsão entre partículas é reduzida, propiciando colisão e adesão entre as partículas formando, desta forma, os flocos.

Do ponto de vista eletrostático, a coagulação reduz o potencial zeta (ou seja, o potencial elétrico entre o meio líquido e a superfície das partículas) adicionando íons específicos. Okuda et al. (2001) afirmam que o potencial zeta é um método analítico para avaliar o efeito da coagulação, auxiliando na definição da dosagem ótima de coagulante e no pH do meio.

De acordo com Pritchard et al. (2010), o coagulante deve ser misturado rapidamente, por alguns segundos, após sua adição ao efluente (Fig. 1.2) para garantir dispersão uniforme e alta interação entre coagulante e efluente. Na etapa seguinte ocorre a floculação, devido à neutralização entre a acidez do coagulante e a alcalinidade do efluente. Os flocos são formados devido à atração eletrostática entre as cargas positivas resultantes da ionização do coagulante e as cargas negativas das partículas. Os flocos são constituídos de partículas maiores e mais pesadas, que tendem a precipitar com a diminuição da velocidade do fluxo (Junior et al., 2019).

Durante a floculação, o tempo e a agitação devem ser definidos para garantir a formação dos flocos, uma vez que a agregação de partículas suspensas ocorre devido à colisão entre as partículas previamente desestabilizadas pelo coagulante. A aglomeração das partículas ocorre devido às forças de Van Der Waals (maximova e Dahl, 2006). Quanto maior o gradiente de velocidade, mais rápida a taxa de aglutinação de partículas; no entanto, os flocos crescerão até um limite máximo, pois as altas forças de cisalhamento podem fazer com que as partículas aglomeradas se quebrem (Di Bernardo e Dantas, 2005). Portanto, após formado os flocos, velocidades de mistura mais baixas devem ser selecionadas neste estágio (Fig. 1.2) (Pavanelli e Di Bernardo, 2001).

FIGURA 1.2 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE MISTURA NAS ETAPAS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.



FONTE: O autor (2025).

É de suma importância a aplicação ótima da etapa de CF visto que, quando não são realizadas corretamente, o desempenho do tratamento fica comprometido, colocando em risco a qualidade do efluente tratado.

Na Tabela 1.1 são demonstradas as condições operacionais (coagulação, floculação e sedimentação) utilizadas no tratamento de efluentes da indústria alimentícia com coagulantes naturais, de origem vegetal.

Devido à diversidade de efluentes industriais, experimentos devem ser realizados para definir as condições operacionais ótimas para coagulação, floculação e sedimentação, com a finalidade de se atingir alta eficiência e baixo custo. Um modo eficiente de determinar a dosagem de coagulante e o pH da coagulação é conduzir testes em reatores estáticos, conhecidos como Jar-Tests (Fig. 1.3). Neste equipamento o efluente é inserido com dosagens específicas de coagulante em uma agitação rápida. Após um curto período de tempo, a taxa de agitação é reduzida para promover a formação de flocos, e então a amostra é submetida a repouso por um período definido até que as amostras de água decantada sejam coletadas (sedimentação) (Tabela 1.1).

A eficiência da coagulação depende de condições operacionais como pH inicial, dosagem do coagulante, tamanho das partículas, temperatura, taxa de agitação e tempo de reação, assim como da natureza química do efluente e do coagulante (Altenor e Gaspard, 2014). Os estudos sobre tratamento de efluentes

geralmente utilizam testes experimentais como ferramenta para avaliar as condições ideais nas quais ocorrem coagulação, floculação e sedimentação (Shak e Wu, 2014; Shak e Wu, 2015; Okuda et al., 2001; Bhatia et al., 2007a; Garde et al., 2017). Os dados resultantes são plotados para demonstrar alterações ou tendências em parâmetros de qualidade (por exemplo, cor, turbidez, DQO, sólidos totais, entre outros) em função das condições operacionais (pH do meio e dosagem do coagulante, por exemplo); o objetivo é derivar as condições ideais para que ocorra máxima redução de partículas (Valverde et al., 2013). Esses gráficos são de suma importância na interpretação dos resultados (Kim et al., 2001).

TABELA 1.1 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS UTILIZADAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA EMPREGANDO COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL.

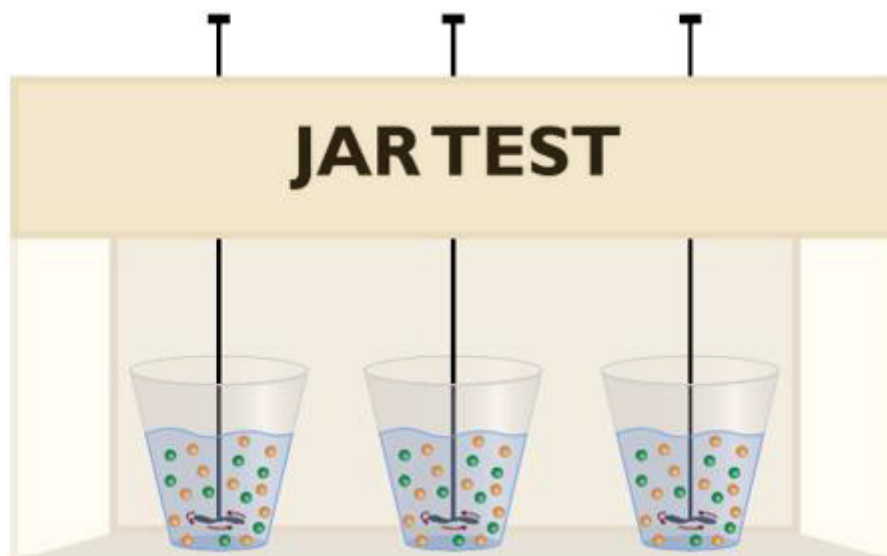
Efluente	Coagulante	T (°C)	Dosagem de coagulante	Volume do efluente (L)	pH	Equipamento	Coagulação (velocidade de mistura rápida)	Floculação (velocidade de mistura lenta)	Sedimentação	Principais resultados	Referência
Indústria de laticínio	Sementes de M. <i>oleifera</i>	25±1	0.15–0.25 g	0.2	5–10	Jar-Test	Diferentes velocidades de rotação por 60 min		60 min	98% de remoção de cor e turbidez	Vieira et al., 2010
Indústria de laticínio	Sementes de M. <i>oleifera</i>	25±1	0.5–1.25 g/L	-	-	Jar-Test	200 rpm por 1 min	100 rpm por 40 min	40 min e 60 min	95% de remoção de turbidez	Junho et al., 2021
Indústria de laticínio	Sementes de M. <i>oleifera</i>	25±1	100–400 mg/L	-	-	Jar-Test	60 s	15 a 20 rpm	30min	Eficiência média de remoção de 62,5% para turbidez, 51,9% para COD e 80% para salinidade. 48,1–78,5% de remoção de cor na concentração de 100–600 mg/L;	George et al., 2016
Indústria de laticínio	Tanino vegetal	25±1	100–600 mg/L	1.5	6.0–7.0	Jar-Test	120 rpm por 90 s	45 rpm por 30 min	60 min	remoção máxima de ST de 13,6% a 500 mg/L; remoção máxima de COD de 41,6% a 400 mg/L; remoção máxima de turbidez de 89,4% a 300 mg/L	Justina et al., 2018
Indústria de laticínio	Sementes de M. <i>oleifera</i>	25±1	3000 mg/L	-	Sem correção de pH	Jar-Test	100 rpm por 2 min	20 rpm por 10 min	60 min	Eficiência de remoção de 96–99% para COD, turbidez e cor	Mateus et al., 2017
Efluente de limpeza de laticínio	Extrato de sementes de Sementes	25±1	800–2000 mg/L	0.25	pH natural e 9	-	100 rpm por 2 min	20 rpm por 10 min	60 min	Aproximadamente 90% de remoção de turbidez	Triques et al., 2020

Moagem de óleo de palma	Sementes de M. <i>oleifera</i>	27–30	500–5000 mg/L	0.5	4.51	Jar-Test	250 rpm e 3 min	30 rpm e 30 min	60 min	A dosagem ótima de moringa (2000 mg/L) proporcionou porcentagens de remoção de 95,42% para SST, 88,30% para turbidez, 90,15% para cor e 87,05% para óleo e graxa	Jagaba e Hayder, 2020
Indústria de processamento de mandioca	Quiabo (<i>Abelmoschus esculentus</i> , Figo (<i>Ficus exasperata</i> e Bridelia (<i>Bridelia ferruginea</i> <i>ae</i>) Coagulant es comerciais naturais (Acquapoli WW, Acquapoli S5T, Tanfloc SL, Tanfloc SG)	-	0–100 mL	0.25	-	Jar-Test	30 s por 120 rpm	20 rpm por 15 min	60 minutes	A turbidez foi reduzida de 168 UT para até 6 uT	Adewuyi e Adewumi, 2018
Indústria de processamento de mandioca	Acquapoli WW, Acquapoli S5T, Tanfloc SL, Tanfloc SG)	-	160–800 Mg/L	0.5	natural pH	Jar-Test	120 rpm por 2 min	20 rpm por 15 min	5–20 min	Eficiência de remoção acima de 77,5% para cor e 88,5% para turbidez	Dos Santos et al., 2018
Amido de tapioca	Sementes de M. <i>oleifera</i>	26	110–150 Mg/L	1	-	Tanque clarificador	15 a 20 rpm por 5 min		3 h	Até 99,6% de remoção para DBO, 99,7% para DQO e 91,5% para SST. O pH do efluente aumentou de 5,8 para 6,7–7,8	Suhartini et al., 2013

Polpa de café	Sementes de M. <i>oleifera</i>	25	0-60 mL/L	-	4-8	Jar-Test	1600 rpm por 10 s	20 rpm por 5 min	90 min	Até 84,27% de remoção de SST	Matos et al., 2007
Processo de fermentação de café	Sementes de M. <i>oleifera</i>	-	0-4 g/L	0.9 L	3-7	Jar-Test	2 min	5 min	24 h	Até 54% de remoção para SST, 100% para DQO insolúvel, 25% para DQO total e 100% para nitratos e nitritos Máximo de 56% e 67% de remoção de cor usando coagulante de moringa juntamente com cloreto de sódio e cloreto de potássio, respectivamente As eficiências de remoção variaram dependendo dos coagulantes químicos (sulfato férrico, sulfato de alumínio e sulfato de cálcio)	Garde et al., 2017
Lavagem de resíduos de destilaria	Sementes de M. <i>oleifera</i>	30	20-60 mL	0.5	4-9	Jar-Test	100 rpm por 2 min	40 rpm por 30 min	30 min	usados em conjunto com moringa. O sulfato de alumínio junto com extrato de moringa em pH 4,0 produziu as melhores taxas de remoção: 97% para cor, 87 % para DQO e 100% para turbidez Os coliformes totais e termotolerantes foram reduzidos em 96,5% e 94,8%, respectivamente, mas a turbidez não foi afetada	Prasad, 2009
Lavagem de resíduos de destilaria	Sementes de M. <i>oleifera</i>	30	20-80 mL/L	1	2-6	Jar-Test	300 rpm por 2 min	30 rpm por 30 min	4 h		David et al., 2016
Efluentes de atividade suína	Sementes de M. <i>oleifera</i>	-	1-20 mL	0.5	4.2	Jar-Test	160 rpm por 30 s	15 rpm por 15 min	2-24 h		Lo Monaco et al., 2010
Cervejaria	Tanino	25	0.12-0.18	1.2	4.5-8	Jar-Test	120 rpm por	30 rpm por	10 min	99% de remoção de	Junior et

Extratos de chá verde	vegetal		mL/L			5 min	30 min		Remoção de turbidez, ST e polifenóis de até 96%, 16% e 19%, respectivamente	turbidez	al., 2019
	Sementes de <i>M. oleifera</i>	-	100-10000 mg L ⁻¹	-	Jar-Test	150 rpm por 5 min	30 rpm por 30 min	-			Bindes et al., 2019
Matadouro	Sementes de <i>M. oleifera</i>	25±1	3-7 g/L	1	5-9	Jar-Test	100 rpm por 5 min	20 rpm por 20 min	Até 64% de redução de COD		Real-Olvera et al., 2015

FIGURA 1.3 - REPRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO JAR TEST UTILIZADO PARA OS TESTES DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.



FONTE: O autor (2025).

1.4 COAGULANTES

Os coagulantes utilizados no tratamento de efluentes podem ser classificados em químicos (também chamados sintéticos ou inorgânicos) e naturais (Vieira et al., 2010; Madrona et al., 2010). Os materiais à base de metal são os coagulantes amplamente empregados no tratamento de águas residuais. Apesar de sua ampla aplicabilidade, os desafios associados ao seu uso estimularam o desenvolvimento de pesquisas visando o uso de coagulantes naturais, que são mais sustentáveis (Oladoja, 2015).

1.4.1 COAGULANTES SINTÉTICOS

Os coagulantes sintéticos mais utilizados são os sais de ferro e alumínio, sendo AlCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 e $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ os mais frequentes devido ao baixo custo (Baghvand et al., 2010; Okuda et al., 1999). A definição do coagulante depende principalmente das características do efluente.

A coagulação com sais de alumínio e ferro envolve processos químicos e físicos. A hidrólise induzida pelo coagulante, que resulta na formação de espécies hidrolisadas carregadas positivamente, é um processo químico. A quantidade de espécies hidrolisadas geradas depende da dosagem do coagulante e do pH do

efluente (Duan e Gregory, 2003). Normalmente, esses coagulantes só serão eficazes se o efluente for alcalino; caso contrário, a coagulação será limitada devido ao excesso de prótons liberados pelo coagulante. Os mecanismos físicos incluem o contato das espécies hidrolisadas com as impurezas do efluente, formando flocos (fase de floculação) (Di Bernardo e Dantas, 2005). A neutralização das cargas negativas dos sólidos do efluente pelas espécies hidrolisadas promove a agregação de partículas, o crescimento dos flocos e, conseqüentemente, a rápida precipitação (Duan e Gregory, 2003).

Embora os coagulantes sintéticos sejam reconhecidos pela sua eficácia no tratamento de águas residuais, o uso de agentes à base de sais de alumínio exige um controle rigoroso sobre a concentração residual de material inorgânico no efluente tratado. Conforme Yin (2010), após a dissolução do sal, o cátion liberado será adsorvido pelo material sólido suspenso. Em outras palavras, o material sedimentado apresentará uma alta concentração do cátion (como Al_{3+}), o que impede a descarga segura do efluente tratado no meio ambiente. Estudos associam a alta ingestão de alumínio a possíveis problemas de saúde, como a doença de Alzheimer (Ang e Mohammad, 2020).

1.4.2 COAGULANTES NATURAIS À BASE DE PLANTAS

Os coagulantes de origem vegetal desempenham um papel importante no tratamento sustentável de águas residuais devido à sua alta biodegradabilidade, natureza não corrosiva e ausência de toxicidade. Um número crescente de artigos científicos debate acerca das propriedades coagulantes de sementes e resinas de casca de diversas espécies vegetais, além de extratos de conchas ósseas, exoesqueletos de moluscos e solos minerais naturais (Oladoja, 2015; Choy et al., 2014; Choy et al., 2015; Ali et al., 2004).

Os coagulantes naturais são formados por grandes cadeias moleculares que podem ter cargas positivas ou negativas. Esses coagulantes podem ser catiônicos, aniônicos ou não iônicos, sendo que os dois primeiros são coletivamente chamados de polieletrólitos (Bolto e Gregory, 2007). Entretanto, apenas os polieletrólitos catiônicos (aqueles com cargas positivas) são considerados ideais para uso como coagulantes (Oladoja et al., 2015).

Coagulantes classificados como polieletrólitos catiônicos são ideais para o tratamento de águas residuais, pois o material coloidal presente no efluente geralmente possui carga elétrica superficial negativa. Os polieletrólitos catiônicos liberam espécies catiônicas no efluente, desestabilizando as partículas e, assim, promovendo a coagulação. A atração resultante entre as partículas (força de Van der Waals) aumenta a formação de flocos devido à redução da carga negativa na superfície coloidal (Madrona et al., 2010; Baghvand et al., 2010; Okuda et al., 1999).

Coagulantes naturais têm sido investigados como substitutos parciais ou completos dos coagulantes químicos para melhorar o estágio de CF, tanto na qualidade dos flocos produzidos quanto na redução ou eliminação de metais no lodo final (Madrona et al., 2010). O uso de coagulantes naturais combina as propriedades desejadas para o tratamento de efluentes com abundância, baixa toxicidade, baixo custo, alta biodegradabilidade e baixa produção de lodo residual (Madrona et al., 2010; Katayon et al., 2006; Awad et al., 2013). No entanto, a presença de polieletrólitos orgânicos naturais no tratamento de água potável pode aumentar o teor de matéria orgânica, causando sabores e odores desagradáveis. Portanto, a introdução de coagulantes naturais no tratamento de água deve ser cuidadosamente avaliada, pois a água tratada pode conter resíduos que serão ingeridos pelos consumidores (Choy et al., 2015; Pritchard et al., 2010; Choy et al., 2014). No tratamento de efluentes, esse aspecto ainda é pouco explorado (Sujana et al., 2019; Vijayaraghavan e Sivakumar, 2011; Prasad e Rao, 2016).

A Tabela 1.2 resume as principais conclusões de diversos estudos sobre o uso de coagulantes de origem vegetal no tratamento de águas residuais provenientes da indústria alimentícia.

TABELA 1.2 - USO DE COAGULANTES A BASE DE PLANTATA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.

Coagulante	Efluente	Objetivos	Principais resultados	Referência
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Indústria de laticínio	Investigar o potencial de sorção da <i>M. oleifera</i> para a remoção de compostos orgânicos	Eficiências de remoção de até 98% para cor e turbidez usando 0,2 g de pó de semente	Vieira et al., 2006
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Matadouros	Investigar a adsorção de poluentes orgânicos quando a semente de <i>M. oleifera</i> é empregada como um coagulante natural	Redução de 64% de DQO usando 7 g/L de semente em pó e pH 9	Real-Olvera et al., 2015
Goma de semente de <i>Cassia obtusifolia</i>	Produção de óleo de palma	Avaliar o potencial da goma de semente como uma alternativa de coagulante natural ao alumínio	Remoção de 87% de SST e 55% de DQO na concentração de 1,0 g/L, considerando pH inicial do efluente sendo 3,0 e tempo de sedimentação de 45 min.	Shak e Wu, 2014
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Amido de tapioca	Investigar a adição de semente em pó na redução de parâmetros físico-químicos e coliformes totais, bem como no aumento do pH	DBO, DQO e SST foram significativamente reduzidos, enquanto o pH atingiu a faixa aceitável para descarte de efluentes	Suhartini et al., 2013
Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	Polpa de café	Determinar a melhor combinação entre pH e concentração do extrato de semente	Maior remoção de sólidos suspensos ocorreu em pH 4,0–5,0 e dosagem 10 mL/L	Matos et al., 2007
Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	Fermentação de café	Investigar a eficácia do extrato de semente no tratamento de águas residuais	Redução significativa de SST (de 8% para 54%), DQO (de 26% para 100%) e nitrato e nitrito (de 20% para 100%)	Garde et al., 2017
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Produção de óleo de palma	Avaliar o uso das sementes como coagulante natural na coagulação-floculação de efluentes	95% de remoção de sólidos suspensos e 52,2% de redução de DQO, com melhor desempenho em 30 °C	Bhatia et al., 2007a
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Lavagem de resíduos de destilaria	Determinar os efeitos da dosagem de coagulante, pH e concentração de sal na remoção da cor do efluente	As sementes podem ser introduzidas para remover a cor de efluentes de lavagem de resíduos de destilaria. Este estudo demonstra claramente que a metodologia de superfície de resposta foi um dos métodos adequados para otimizar as melhores condições operacionais	Prasad, 2009
Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	Lavagem de resíduos de destilaria	Avaliar a eficiência do extrato das sementes em conjunto com coagulantes convencionais para a remoção de contaminantes físico-químicos	A semente apresentou capacidade significativa de redução de cor, DQO e turbidez quando usada como um auxiliar coagulante junto com coagulantes químicos. O uso combinado de <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio foi o mais eficaz, ao	David et al., 2016

Extrato de sementes de <i>M. oleífera</i>	Águas residuais suínas	Avaliar a eficiência do extrato de sementes na remoção de turbidez e coliformes (coliformes totais e termotolerantes)	remover 96,5% de cor, 87% de DQO e 99,9% de turbidez em pH operacional ótimo de 4,0 A turbidez permaneceu inalterada, mas os coliformes totais e termotolerantes foram removidos em 96,5% e 94,8%, respectivamente	Lo Monaco et al., 2010
Extrato de sementes de <i>M. oleífera</i>	Águas residuais de criação de gado leiteiro	Avaliar o efeito do extrato de sementes na remoção de sólidos totais (ST), sólidos em suspensão totais (SST) e demanda química de oxigênio (DQO)	O extrato da semente contribuiu para a remoção de ST e DQO, mas não aumentou a eficiência da remoção de SST A turbidez foi reduzida em mais de 95%, permitindo a reutilização da água. O cultivo de MO pode ser uma fonte extra de receita para produtores de leite	Francisco et al., 2014
Sementes de <i>M. oleífera</i>	Indústria de laticínio	Avaliar potencialidades ambientais e econômicas da aplicação do coagulante no tratamento de efluentes		Junho et al., 2021
Sementes de <i>M. oleífera</i>	Indústria de laticínio	Analisar o emprego das sementes como adsorvente natural para o tratamento de efluentes	Remoção bem-sucedida de turbidez, DQO e salinidade	George et al., 2016
Tanino vegetal	Águas residuais de cervejaria	Avaliar e otimizar as condições de coagulação-floculação do tratamento de efluentes de cervejaria utilizando um coagulante de tanino vegetal.	Os melhores resultados foram obtidos empregando-se 0,23 mL L ⁻¹ de tanino vegetal em pH = 4,9, resultando na remoção de aproximadamente 99% da turbidez e da cor aparente. O Tanfloc mostrou-se eficiente na floculação, permitindo o reúso da água na indústria Condições de clarificação otimizadas proporcionaram reduções de 96%, 16% e 19% para turbidez, ST e polifendóis usando extrato de MO versus 95%, 16% e 18% usando quitosana. A extração e clarificação com MO seguida de centrifugação produziram extratos de chá verde claros enriquecidos com compostos bioativos a um custo menor	Junior et al., 2019
Sementes de <i>M. oleífera</i>	Extratos de chá verde	Comparar o efeito isolado da centrifugação com o impacto dos coagulantes naturais (quitosana e moringa) seguidos pela centrifugação na clarificação do extrato de chá verde		Bindes et al., 2019
Amido de arroz	Produção de óleo de palma	Avaliar o desempenho de amidos não modificados para serem utilizados como coagulantes naturais na coagulação-floculação em comparação com o coagulante de alumínio	O amido de arroz proporcionou remoção de sólidos suspensos totais (SST) semelhante à do alumínio. Para tal, foram empregados valores de dosagem, pH inicial, tempo de	Teh et al., 2014

Sementes de <i>M. oleifera</i>	Indústria de laticínio	Avaliar o uso de <i>M. oleifera</i> no processo de coagulação/floculação/sedimentação (CFS) seguido pelo processo de microfiltração (MF) e nanofiltração (NF) no tratamento de efluentes	sedimentação e velocidade de agitação lenta de 2 g/L, pH 3, 5 min e 10 rpm, respectivamente A associação dos tratamentos apresentou alta eficiência de remoção para demanda química de oxigênio (DQO) (média de 96%), turbidez e cor (média de 99%), atendendo aos padrões de reúso de água. O efluente tratado obtido com este processo apresenta melhor qualidade do que o efluente obtido com os tratamentos convencionais	Mateus et al., 2017
<i>Vagens de quiabo</i> (<i>Abelmoschus esculentus</i>), casca de figo (<i>Ficus exasperata</i>) e casca de <i>Bridelia</i> (<i>Bridelia ferrugineae</i>)	Indústria de processamento de mandioca	Investigar a atividade de três coagulantes orgânicos e sua eficiência no tratamento de águas residuais industriais comparada com coagulante químico inorgânico (sulfato de alumínio)	Para o efluente com turbidez inicial de 168 uT, os resultados mostraram que a menor turbidez atingida após a aplicação dos três coagulantes orgânicos foi de 6 UT. Desta forma, concluiu-se que os coagulantes orgânicos utilizados podem ser empregados como substitutos parciais de coagulantes inorgânicos	Adewuyi e Adewumi, 2018
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Produção de óleo de palma	Determinar a eficiência de remoção de DQO obtida de sementes de moringa e nanopartículas magnéticas sintéticas	A síntese de microondas da moringa magnética é um processo de baixo custo para a produção de um coagulante altamente eficaz (remoção de 90% de DQO)	Noor et al., 2021
Sementes de <i>M. oleifera</i>	Produção de óleo de palma	Avaliar a dose ideal de coagulante para maior remoção de contaminantes	Os resultados indicaram que a dosagem ideal para <i>M. oleifera</i> foi de 2000 mg/L	Jagaba e Hayder, 2020
Tanino vegetal	Indústria de laticínio	Comparar o desempenho do tanino e do cloreto de polialumínio (PAC) no processo de coagulação	Os resultados não mostraram diferenças estatísticas entre o desempenho dos dois coagulantes com base na demanda química de oxigênio, cor, turbidez e remoção de sólidos totais. O tanino mostrou bom desempenho dentro de um pH mais amplo, variando de 5,0 a 10,0.	Justina et al., 2018
Coagulantes naturais comercializados (Acquapol WW, Acquapol S5T, Tanfloc	Indústria de processamento de mandioca	Investigar a eficiência de diferentes coagulantes na remoção de cor e turbidez de efluentes da indústria de amido	Os coagulantes naturais apresentaram maior eficiência de remoção de cor e turbidez quando comparados aos coagulantes químicos. A melhor	Dos Santos et al., 2018

SL e Tanfloc SG)	concentração de coagulante natural (Acquapol S5T e Tanfloc SL) foi de 320 mg L ⁻¹ , capaz de remover cor (≥77,5%) e turbidez (≥88,5%)		
Extrato de sementes de <i>M. oleífera</i> e nanopartículas de óxido de ferro funcionalizadas com extrato de moringa	Águas residuais de limpeza de laticínios	Investigar dois coagulantes orgânicos - extrato de sementes de <i>M. oleífera</i> e nanopartículas de óxido de ferro funcionalizadas com o extrato de MO - como alternativa para o tratamento primário	As nanopartículas funcionalizadas com o extrato de MO mostrou-se uma boa alternativa para o tratamento primário de efluentes, pois proporciona cerca de 90% de remoção de turbidez em um tempo de sedimentação reduzido (7 minutos em comparação a 60 minutos quando utilizado somente <i>M. oleífera</i>)

Triques et al., 2020

1.4.3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL

Dada a ampla variedade de coagulantes disponíveis (tanto químicos quanto naturais), escolher o mais eficiente pode ser um desafio. Os parâmetros do processo (como dosagem, tempo de sedimentação, misturas, temperatura e pH) devem ser considerados cuidadosamente para alcançar o melhor desempenho na remoção de contaminantes (Lee et al., 2014; Nath et al., 2021). As Tabelas 1.1 e 1.2 apresentam os parâmetros do processo comumente utilizados em efluentes da indústria alimentícia tratados com coagulantes de origem vegetal, além dos principais resultados de desempenho.

1.4.3.1 Dosagem

A dosagem inadequada de coagulante leva a uma qualidade de água insatisfatória após o tratamento. Portanto, é crucial determinar a faixa de dosagem necessária para alcançar a remoção máxima de poluentes com o menor custo possível. Entre os diversos mecanismos de coagulação, apenas a neutralização de carga e a formação de pontes são negativamente impactadas pela dosagem, principalmente devido à relação estequiométrica (Garde et al., 2017; Kumar et al., 2017).

Quando a turbidez do efluente é alta (>100 UT), a dosagem de coagulante necessária tende a ser menor em comparação com águas residuais de baixa turbidez (5–10 UT) (Katayon et al., 2006). Uma causa provável é a frequência de colisão entre partículas e coagulante (Jiang, 2015). Com uma alta turbidez, que indica uma alta concentração de impurezas (e uma alta frequência de colisão), a coagulação ocorre mais facilmente, exigindo menores dosagens de coagulante. Em contraste, uma baixa turbidez requer uma maior dosagem de coagulante devido à menor frequência de colisão entre impurezas e coagulantes (Valverde et al., 2013). A quantidade ideal de coagulante pode ser identificada ao correlacionar a turbidez medida (ou qualquer outro parâmetro de poluição) com a dosagem aplicada (Awad et al., 2013; Sujana et al., 2019).

A eficiência na remoção de contaminantes diminui quando a dosagem de coagulante é insuficiente ou excessiva. O uso excessivo pode causar a reversão de

carga, levando à repulsão das partículas e dificultando a formação de flocos. Além disso, a dosagem excessiva reduz a quantidade de áreas disponíveis para adsorção, ao cobrir a superfície do coagulante (Garde et al., 2017; Kim et al., 2001). Assim, adicionar mais coagulante ao tratamento de águas residuais não melhora a coagulação. Por outro lado, uma dosagem insuficiente resulta em coagulação incompleta e ineficaz, pois a maioria das partículas permanece suspensa.

Real-Olvera et al. (2015) avaliaram uma dosagem de 3 a 7 g/L de *M. oleifera* no tratamento de efluentes de matadouros e determinaram que a dosagem de 7 g/L proporcionou os melhores resultados. Em um estudo utilizando o vegetal *Cassia obtusifolia*, utilizando dosagens de 0 a 2,5 g/L, a condição ideal foi de 1,0 g/L para tratar resíduos de óleo de palma (Shak e Wu, 2014) e 2 g/L para amido de arroz (Vijayaraghavan e Sivakumar, 2011).

1.4.3.2 pH

O pH de uma solução influencia a eficiência do processo de coagulação ao modificar a natureza eletroquímica do solvente e dos polímeros iônicos utilizados (Garde et al., 2017; Prasad e Rao, 2016). Portanto, ajustar o pH do sistema é fundamental para garantir uma coagulação eficaz (Sujana et al., 2019; Kumar et al., 2017). A redução do pH diminui a carga da matéria orgânica natural (MON), reduzindo sua solubilidade em água. Como resultado, a eficiência da coagulação é comprometida, pois o principal mecanismo de coagulação é a neutralização de carga, que requer cátions ou polieletrólitos para se ligar à carga negativa da MON (Garde et al., 2017; Sujana et al., 2019).

Um pH adequado também é crucial para a formação de poli-hidróxidos metálicos e a precipitação de fases coloidais sólidas (Sujana et al., 2019). Os polieletrólitos catiônicos são os tipos mais comuns de polieletrólitos orgânicos devido à sua capacidade de se ligar a MONs carregadas negativamente. A carga positiva nesses polímeros pode aumentar em pH mais baixo quando os grupos funcionais responsáveis pelo comportamento catiônico são aminas (primárias, secundárias e terciárias (Sujana et al., 2019).

Alguns estudos otimizaram o pH do sistema de tratamento ao usar coagulantes à base de plantas, por exemplo, *Coccinia indica* (Patale e Pandya, 2012), goma de quiabo (Agarwal et al., 2003), cacto e cascas de feijão-jacinto

(Shilpa e Girish, 2012). O pH ideal para coagulação usando goma de quiabo foi 9,2, com remoção de 98,3% de sólidos suspensos (Agarwal et al., 2003). A maioria das leguminosas usadas como coagulantes naturais tem melhor desempenho quando a coagulação ocorre em um pH otimizado de 7 a 8,5 (Choy et al., 2014; Choy et al., 2015). No entanto, o mesmo coagulante pode exibir diferentes pHs ideais dependendo do efluente em tratamento. Por exemplo, *M. oleifera* mostrou desempenho ideal em pH 9,0 para efluente de matadouro (Real-Olvera et al., 2015); entre 4,0 e 5,0 para o efluente da polpa dos frutos do café (Shak e Wu, 2014) e 4,0 para a lavagem de resíduos da destilaria (David et al., 2016).

1.4.3.3 Temperatura

A temperatura é um dos fatores menos estudados no tratamento de efluentes. Poucos estudos relataram o impacto da temperatura na eficiência do tratamento (Shak e Wu, 2014; Bhatia et al., 2006; Jagaba e Hayder, 2020; Lee et al., 2012). A temperatura influencia a cinética da coagulação e a eficácia na remoção de impurezas (Teh et al., 2016; Zhang et al., 2013). A eficiência da coagulação aumenta com a elevação da temperatura devido à maior taxa de colisão entre as partículas. Isso resulta em menor viscosidade, favorecendo a distribuição homogênea dos coagulantes durante a etapa de mistura (Gao et al., 2007). Em baixas temperaturas, a agregação de flocos tende a ser fraca devido à redução das colisões entre partículas. Devido à formação de flocos irregulares sob condições de baixa temperatura, a dosagem de coagulante necessária para remover a matéria orgânica é maior (Lee et al., 2012; Zhang et al., 2013).

Em muitos casos, a temperatura do efluente é um parâmetro incontrolável que influencia a remoção de MON por coagulação. Por isso, as dosagens de coagulante devem ser reavaliadas ao longo das estações para considerar as variações de temperatura (Aguilar et al., 2003; Lee et al., 2012).

Para coagulantes à base de plantas, a temperatura ideal do processo é de 25 a 30 °C (Shak e Wu, 2014; Bhatia et al., 2006; Jagaba e Hayder, 2020; Lee et al., 2012). Como os agentes ativos nesses coagulantes são geralmente proteínas, a temperatura do sistema deve ser aumentada com cuidado para evitar uma redução na capacidade de coagulação devido à desnaturação das proteínas. A desnaturação

provoca alterações na configuração espacial das proteínas, reduzindo ou eliminando sua atividade biológica.

1.4.3.4 Mistura

A mistura é essencial nos processos de coagulação, incluindo tanto a mistura rápida, que promove a interação dos coagulantes com partículas suspensas para formar microflocos, quanto a mistura lenta, que favorece a agregação desses microflocos em flocos maiores. Uma velocidade de mistura muito baixa e um tempo de mistura muito curto podem diminuir a taxa de formação de flocos, enquanto uma velocidade de mistura excessivamente rápida e um tempo de mistura muito longo podem quebrar os flocos, resultando em baixa eficiência de sedimentação (Duan e Gregory, 2003; Lee et al., 2012; Teh et al., 2016).

Conforme demonstrado na Tabela 1, os parâmetros de mistura no tratamento de efluentes da indústria alimentícia com coagulantes de origem vegetal variam de 100 a 300 rpm por 30 segundos a 5 minutos para mistura rápida e de 20 a 100 rpm por 5 a 40 minutos para mistura lenta, seguidos de sedimentação por 30 minutos a 24 horas.

1.4.4 COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL X COAGULANTES QUÍMICOS

No tratamento de efluentes, a etapa de coagulação é realizada pela adição de um agente coagulante para reduzir ou remover impurezas suspensas e outros tipos de poluentes, como compostos orgânicos (Jiang, 2015; Oladoja, 2015). O agente coagulante pode ser de origem química ou natural (De Paula et al., 2014).

Atualmente, os coagulantes químicos são amplamente utilizados em ambientes industriais devido ao seu custo reduzido, alta eficiência, facilidade de manuseio e ampla disponibilidade no mercado. $AlCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ e $Fe_2(SO_4)_3$ são os coagulantes mais comuns (Nimesha et al., 2022). Embora esses fatores favoreçam a escolha de coagulantes químicos em vez de alternativas vegetais, esses agentes químicos levantam preocupações devido à sua baixa biodegradabilidade e toxicidade para organismos vivos. Concentrações residuais de alumínio ainda podem ser detectadas após o tratamento (Nimesha et al., 2022; Freitas et al., 2008). Pesquisas indicam que a neurotoxicidade do alumínio está

associada à doença de Alzheimer (Freitas et al., 2015). Além disso, coagulantes sintéticos podem gerar subprodutos perigosos, como a acrilamida, que é uma substância cancerígena e neurotóxica (Kurniawan et al., 2020). De acordo com Kurniawan et al. (2020), o descarte de lodo tóxico contamina a água e o solo, prejudicando plantas e animais. Como resultado, os coagulantes químicos não são considerados sustentáveis e não se qualificam como opções ecológicas (Nimesha et al., 2022). Portanto, é necessário promover o uso de agentes coagulantes sustentáveis e igualmente eficazes.

Os coagulantes naturais possuem características de biodegradabilidade, não toxicidade, não corrosividade, além de reduzir a produção de lodo e serem ambientalmente corretos (Vieira et al., 2010; Bhuptawat et al., 2007; Kansal e Kumari, 2014; Teh et al., 2014). Eles são amplamente utilizados na purificação de água tradicional, particularmente em comunidades desfavorecidas (Choy et al., 2014; Choy et al., 2015). Devido a essas aplicações, os coagulantes naturais têm despertado o interesse da comunidade científica por seus benefícios importantes para a saúde e o meio ambiente, bem como por sua eficácia na eliminação de contaminantes.

Diversas pesquisas demonstraram a eficácia dos coagulantes vegetais no tratamento de águas residuais: a remoção de 98% da cor e turbidez em águas residuais da indústria de laticínios (Junho et al., 2021); a redução de 64% de DQO em águas residuais de matadouros (Real-Olvera et al., 2015); a eliminação de 87% de SST e 55% de DQO em efluentes de moagem de óleo de palma (Shak et al., 2015); a redução de 54% de SST, 100% de DQO e 100% de nitratos e nitritos em águas residuais da fermentação de café (Garde et al., 2017); a remoção de 95% de sólidos suspensos e 52,2% de DQO em efluentes de moagem de óleo de palma (Bhatia et al., 2007a); a eliminação de 96,5% de cor, 87% de DQO e 99,9% de turbidez em águas residuais da lavagem de destilaria (David et al., 2016); e a remoção de 90% de DQO em efluentes de moagem de óleo de palma (Noor et al., 2021). No entanto, essas pesquisas foram predominantemente em pequena escala. A aplicação de coagulantes naturais em larga escala para o tratamento de águas residuais ainda é restrita, principalmente devido à ausência de incentivos fiscais e à falta de dados consistentes sobre desempenho, controle de qualidade e normas de produção de extratos vegetais (Choy et al., 2014; Nimesha et al., 2022; Ahmad et al., 2021).

Embora a *M. oleifera* seja o coagulante vegetal mais amplamente utilizado e estudado (Real-olvera et al., 2015; George et al., 2016; Lo Monaco et al., 2010; Valverde et al., 2013; De Paula et al., 2014), diversos outros coagulantes vegetais também foram reconhecidos, incluindo: sementes de Nirmali (*Strychnos potatorum*) (Prabhakaran et al., 2020); feijão-jacinto (*Dolichos lablab*) (Shilpa e Girish, 2012), banana (*Musa paradisiaca*) (Daverey et al., 2019); diferentes espécies de cactos (Rebah e Siddeeg, 2017); foice (*Cassia obtusifolia*) (Shak e Wu, 2014; Shak e Wu, 2015); amido de arroz (Teh et al., 2014a; Teh et al., 2014b); sementes de melancia (Bhattacharjee et al., 2020); sementes de Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) (Jones e Bridgeman, 2019; Mohd-esa et al., 2010); quiabo (*Abelmoschus esculentus*), árvore de lixa (*Ficus exasperata*) e *Bridelia ferruginea* (Adewuyi e Adewumi, 2018).

1.4.5 ASSOCIAÇÃO ENTRE COAGULANTES NATURAIS E INORGÂNICOS

Apesar dos benefícios ambientais associados ao uso de coagulantes naturais para o tratamento de água potável e águas residuais, estes podem não alcançar a mesma eficácia que os coagulantes inorgânicos. Para tirar proveito das vantagens dos coagulantes naturais sem comprometer a eficiência do tratamento, é possível combiná-los com coagulantes inorgânicos, formando um coagulante composto ou utilizando-os como auxiliares de coagulação (Oladoja, 2016; Mohd-Salleh et al., 2019). O coagulante composto é criado pela fusão de dois tipos de coagulantes em um único agente, enquanto os auxiliares de coagulação são adicionados algum tempo após a aplicação do coagulante principal. Essas abordagens ajudam a reduzir o uso de coagulantes não renováveis e o impacto ambiental associado (Rasool et al., 2016).

Há uma quantidade limitada de pesquisas sobre a combinação de coagulantes naturais com coagulantes inorgânicos, como cloreto férrico, cloreto de polialumínio e sulfato de alumínio (Vijayaraghavan e Sivakumar, 2011). Shak e Wu (2015) observaram uma diminuição de 55% no uso de alumínio quando a goma extraída das sementes de *Cassia obtusifolia* foi utilizada como auxiliar no processo de coagulação. A estrutura polimérica da goma natural permitiu a adsorção de mais impurezas no auxiliar coagulante.

Ghebremichael et al. (2009) constataram que aplicar o coagulante de *M. oleifera* antes do coagulante de alumínio levou a uma melhor remoção da turbidez e

do carbono orgânico dissolvido em água de rio superficial. Além disso, o uso do coagulante auxiliar natural permitiu reduzir a quantidade de alumínio necessária em 50–75%. Benefícios semelhantes foram observados quando coagulantes de alumínio e *M. oleifera* foram utilizados em conjunto no tratamento de águas residuais de concreto (De Paula et al., 2014). Freitas et al. (2016) também indicaram que a aplicação do coagulante de *M. oleifera* após o alumínio resultou em uma maior remoção de turbidez em comparação com a aplicação conjunta desses coagulantes para tratar água poluída de riachos.

Materiais naturais que podem não ser eficientes como coagulantes isolados (como lignina, amido, algas verdes e mucilagem de cacto) podem servir como auxiliares de coagulação ou integrar um coagulante composto (Ang e Mohammad, 2020; Rasool et al., 2016; Freitas et al., 2016; Lee et al., 2012). Esses auxiliares melhoram a formação dos flocos através da neutralização de carga e da adesão aos flocos criados pelo coagulante principal. Com a melhoria da eficácia do tratamento e a redução na quantidade de coagulante primário utilizado, também se reduz a quantidade de coagulante inorgânico residual (como alumínio).

1.4.6 PRINCÍPIO ATIVO ENVOLVIDO NA COAGULAÇÃO COM AGENTES NATURAIS

Em termos gerais, a maioria dos coagulantes naturais pode ser categorizada em dois grupos com base nos principais compostos com atividade de coagulação: polissacarídeos e proteínas. Exemplos do primeiro grupo são materiais derivados de plantas ou animais, como quitosana, amido e mucilagem, enquanto coagulantes naturais à base de proteínas normalmente se originam de plantas (Vieira et al., 2010; Shamsnejati et al., 2015). A presença de grupos funcionais hidroxila e amino nesses compostos contribui para sua capacidade de coagulação (Ang e Mohammad, 2020).

Os coagulantes naturais de origem vegetal são, em sua maioria, moléculas orgânicas solúveis em água (Bodlund et al., 2014; Dezfooli et al., 2016; Adinolfi et al., 1994), sendo extraídas principalmente de mucilagens (Diaz et al., 1999; Miller et al., 2008) e sementes (Abidin et al., 2013; Ghebremichael et al., 2005). Como exemplo, as sementes de *M. oleifera* são amplamente utilizadas devido à presença de proteínas catiônicas solúveis, que têm a capacidade de reduzir a turbidez dos

líquidos tratados (Real-olvera et al., 2015; Milind et al., 2012). Nordmark et al. (2016) conseguiram isolar oito diferentes frações de proteínas catiônicas a partir de extratos aquosos dessas sementes. Kwaambwa e Maikokera (2007), por sua vez, sugeriram que as proteínas catiônicas diméricas com massa molecular entre 12 e 14 kDa e ponto isoelétrico de pH 10–11 são os principais agentes ativos responsáveis pelo efeito de coagulação na *M. oleifera*, demonstrando sua natureza altamente catiônica.

Segundo Ghebremichael et al. (2009), o composto ativo da *M. oleifera* consiste em uma mistura de proteínas com características físicas semelhantes, ao invés de uma única proteína. Essa mistura apresenta resistência ao calor e mantém sua atividade de coagulação mesmo após 5 horas de tratamento térmico a 95 °C. Tal propriedade torna o ingrediente ativo altamente adequado para aplicações em sistemas de tratamento de água e efluentes submetidos a altas temperaturas (35–40 °C), situação comum em países tropicais.

Diferentemente dos coagulantes inorgânicos metálicos convencionais, os coagulantes naturais possuem particularidades que tornam o controle de qualidade do ingrediente ativo mais complexo. Esse comportamento está relacionado tanto ao método de extração, que envolve vários estágios, quanto à fonte de coagulante – especialmente no caso dos coagulantes de origem vegetal, cujos compostos variam conforme a espécie e as condições de cultivo (Ang e Mohammad, 2020).

É importante observar que, se uma purificação adicional não for realizada, coagulantes naturais extraídos inevitavelmente conterão impurezas sem propriedades coagulantes, o que afeta a eficiência da coagulação (Milind et al., 2012). A presença de impurezas, como lipídios, pode impedir o contato adequado entre o coagulante e as partículas indesejadas, dificultando a formação de flocos, enquanto os carboidratos podem elevar a concentração de matéria orgânica na solução (Milind et al., 2012; Baptista et al., 2017). Embora seja possível realizar uma purificação extensiva, isso acarreta custos adicionais. O desempenho variável dos coagulantes naturais, portanto, pode dificultar o controle de qualidade devido à sua fonte e ao processo de extração (Ang e Mohammad, 2020).

1.4.7 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE COAGULANTES NATURAIS

Para utilizar o ingrediente ativo isolado, como uma proteína específica, a preparação do coagulante deve seguir três etapas principais (Fig. 1.4): a) estágio

primário – preparação da farinha; b) estágio secundário – extração de proteína; e c) estágio terciário – purificação (Kansal e Kumari, 2014). A sequência desses estágios é crucial, pois influencia diretamente as características do coagulante e seu desempenho no tratamento de CF (Villaseñor-Basulto et al., 2018).

FIGURA 1.4 - PRINCIPAIS TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE COAGULANTES NATURAIS.



FONTE: O autor (2025).

Tomando *M. oleifera* como exemplo, o estágio primário envolve colheita das sementes, remoção das cascas, trituração, peneiramento e secagem. O tamanho de partícula adequado para o tratamento de água e efluentes está entre 0,25 mm e 1,25 mm (Raj et al., 2013). As sementes de *M. oleifera* apresentam diversos compostos indesejados na CF, que podem aumentar a carga orgânica nos efluentes tratados. Por isso, o material obtido no estágio primário passa por tratamentos adicionais.

O estágio secundário envolve a extração de proteínas utilizando água ou soluções salinas (Kansal e Kumari, 2014). O método mais simples para essa extração é o uso de água. Em seu estudo, Jung et al. (2018) misturaram sementes de *M. oleifera* em pó com água e agitaram a solução para liberar as proteínas com carga positiva, que atuam como compostos coagulantes. No entanto, a eficiência de coagulação desse método é geralmente baixa, devido à presença de impurezas não coagulantes e à quantidade reduzida de compostos coagulantes (Ang e Mohammad, 2020). A principal limitação da extração com água é o aumento da DQO, provocado pelo carbono orgânico dissolvido, o que torna essa abordagem pouco recomendada para o tratamento de água potável (Ndabigengesere e Narasiah, 1998). No caso de águas residuais, a eficiência deste método é incerta, pois alguns estudos mostraram redução na DQO, enquanto outros observaram um aumento (Francisco et al., 2014).

No estudo conduzido por Oladoja (2015), a extração com solução salina apresentou uma capacidade coagulante superior à extração com água, o que pode ser atribuído à maior quantidade de proteínas solúveis nos extratos salinos. O autor sugere que as sementes de *M. oleifera* sejam usadas como coagulantes no tratamento de água potável e efluentes para reutilização de água, mas somente após a purificação das proteínas ativas.

A capacidade coagulante de uma substância específica pode ser potencializada com o uso de soluções salinas, como NaCl e CaCl₂, durante o processo de extração (Carvalho et al., 2016; Megersa et al., 2019). As soluções salinas auxiliam na extração de proteínas de coagulantes naturais, pois os sais ajudam a dissociar ligações entre proteínas e aumentam sua solubilidade, o que aprimora a eficácia dos íons coagulantes (Megersa et al., 2019). Os mesmos autores mostraram que a adição de sais (NaCl, KNO₃ e NH₄Cl) aumenta a eficiência de coagulação em comparação com coagulantes de *M. oleifera* extraídos com água. A concentração ideal de coagulante, obtida com NaCl 0,5 M, foi de 2 mg/mL, atingindo uma remoção de turbidez de 91%. Esse ganho se deve ao aumento da solubilidade das proteínas do coagulante natural na presença de sal, que quebra ligações proteína-proteína. Carvalho et al. (2016) observaram que a extração do coagulante de *M. oleifera* com CaCl₂ resultou em uma remoção de turbidez ainda maior em comparação com NaCl, o que pode ser atribuído à participação dos íons de cálcio no processo de coagulação.

Além de aumentar a quantidade de compostos coagulantes extraídos, a pureza dos coagulantes naturais também pode ser aprimorada para reduzir tanto a presença de impurezas quanto a dosagem necessária. Os compostos orgânicos presentes nos coagulantes naturais que não contribuem para a coagulação podem permanecer na água tratada como matéria orgânica dissolvida (Sanchez-Martín et al., 2010). Esse resíduo orgânico é indesejável, pois eleva o risco de crescimento bacteriano, atuando como substrato para a formação de subprodutos nocivos (Jensil et al., 2012; Kalibbala et al., 2009). Para evitar esses efeitos negativos, é recomendável que os coagulantes naturais passem por um processo de purificação após a extração.

Somente os compostos que contribuem para as propriedades de coagulação são purificados no terceiro estágio. Independentemente da planta de origem, esses compostos coagulantes são geralmente polissacarídeos ou proteínas (Ang e

Mohammad, 2020). Para se obter coagulantes puros, a purificação pode ser realizada por meio de uma combinação de métodos, incluindo diálise, centrifugação, ultrafiltração, precipitação química, troca iônica e liofilização (Kansal e Kumari, 2014; Okuda et al., 2001). O extrato final pode variar conforme o método de purificação utilizado, e o uso de diferentes solventes e técnicas de fracionamento de extrato resultará em tipos variados de produtos (Bhutada et al., 2016).

Sanchez-Martín et al. (2010) avaliaram o efeito da purificação por troca iônica com solução de NaCl no desempenho de coagulação do extrato de *M. oleífera*. O coagulante purificado em um único estágio apresentou uma dosagem ótima duas vezes maior do que a do coagulante purificado em duas etapas para a remoção de turbidez. Esse processo resultou em coagulantes mais puros, contendo proteínas coagulantes ativas após a segunda eluição. O coagulante purificado obtido por troca iônica mostrou um desempenho comparável ao coagulante convencional de alumínio, necessitando da mesma dosagem (1 mg/L) e alcançando uma eficiência de remoção de turbidez de 83% em água de rio natural (Megersa et al., 2019). Sem esse processo de purificação, o extrato de *M. oleífera* conseguiu apenas 50% de remoção de turbidez com dosagem semelhante e precisou de uma dosagem quatro vezes maior para alcançar 83% de eficiência. Dessa forma, o processo de purificação permite a produção de coagulantes naturais com uma maior concentração de compostos coagulantes ativos, resultando em um desempenho superior mesmo com uma dosagem ótima reduzida (Ang e Mohammad, 2020; Marobhe et al., 2007).

Devido ao elevado custo associado à cromatografia de troca iônica, pesquisadores têm explorado métodos alternativos de purificação que sejam mais viáveis economicamente para aplicação em escala industrial (Ang e Mohammad, 2020). A precipitação química, uma técnica relativamente simples que utiliza sulfato de amônio, foi sugerida como método de purificação para o extrato de *M. oleífera*, visando isolar compostos com atividade coagulante (Dezfooli et al., 2016; Choudhary e Neogi, 2017). Choudhary e Neogi (2017) observaram que o extrato de *M. oleífera* purificado com sulfato de amônio saturado apresentou uma eficiência de remoção de turbidez superior à do alumínio. Assim, esse método de purificação, embora simples, pode ser eficiente e resultar em um coagulante natural com capacidade satisfatória de coagulação (Ang e Mohammad, 2020).

A metodologia utilizada para produzir o coagulante de *M. oleifera* pode ser adaptada para extrair e purificar coagulantes naturais a partir de outras fontes vegetais, como sementes de plantago (*Plantago major* L.), feijão (*Phaseolus vulgaris*), castanha (*Bertholletia excelsa*), manjerição (*Ocimum basilicum*), carvalho (*Quercus robur*), flor de hibisco (*Hibiscus* L.) ou cacto da espécie *Opuntia* (Jones e Bridgeman, 2019; Shamsnejati et al., 2015; Wan et al., 2019; Chaibakhsh et al., 2014; Antov et al., 2018; Sciban et al., 2009). De forma geral, o processo de extração e purificação de coagulantes naturais de plantas segue três etapas, conforme ilustrado na Fig. 1.3. A Tabela 1.3 detalha o processo de preparo de coagulantes naturais empregados no tratamento de águas residuais da indústria alimentícia.

TABELA 1.3 - COAGULANTES NATURAIS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.

Efluente	Coagulante	Preparo do coagulante	Referência
Indústria de laticínio	Sementes de <i>M. oleifera</i>	A biomassa foi cortada, moída e então peneirada. A fração com malha < 0,42 mm foi selecionada para uso. As sementes não foram submetidas à secagem ou qualquer outro processo de preparação.	Vieira et al., 2010
Matadouro	Sementes de <i>M. oleifera</i>	As sementes foram descascadas, reduzidas a um pó fino e, em seguida, peneiradas. Os grãos de sementes brancas com 0,51 mm foram selecionados para uso.	Real-olvera et al., 2015
Produção de óleo de palma	Semente de <i>Cassia obtusifolia</i>	As sementes inteiras foram moídas (0,5–1 mm). Amostras do coagulante moído (2,5 g) foram misturadas com 100 mL de água destilada por 30 s. Em seguida, a mistura foi filtrada. O filtrado foi usado como coagulante.	Shak e Wu, 2014 ; Shak e Wu, 2015
Águas residuais de amido de tapioca	Sementes de <i>M. oleifera</i>	As sementes de <i>M. oleifera</i> foram descascadas, secas e moídas. O pó de semente, peneirado por uma malha de 50 mm, foi então utilizado como coagulante	Suhartini et al., 2013
Águas residuais da polpa de café	Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	O extrato foi obtido a partir da mistura da semente macerada com água; para cada semente foi utilizado 10 mL de água	Matos et al., 2007
Águas residuais de fermentação de café	Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	Os grãos de sementes foram moídos; após, 0,1 g foi misturado com 25 mL de água destilada por 1 min para dissolver o coagulante <i>M. oleifera</i> . Depois, a solução foi filtrada.	Garde et al., 2017
Efluente de produção de óleo de palma	Sementes de <i>M. oleifera</i>	As sementes foram moídas até virar um pó fino, e o óleo foi extraído por 8h com n-hexano. Após	Bhatia et al., 2007a; Bhatia et al., 2007b; Bhatia et al.,

		secar o material resultante, 5 g foram misturados com 100 mL de água destilada por 2 min e então a suspensão foi filtrada.	2006
Águas residuais de destilaria	Sementes de <i>M. oleifera</i>	As sementes foram moídas a pó fino. O componente ativo foi extraído usando solução salina de cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl). Foi usada uma concentração de 4% (4 g de pó em 100 ml de solução salina). Toda a mistura foi agitada por 30 min em temperatura ambiente. A suspensão foi filtrada.	Prasad, 2009
Águas residuais de destilaria	Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	O componente ativo das sementes de MO foi extraído usando solução salina de NaCl (cloreto de sódio) 1 M. Um total de 5 g de pó de semente de <i>M. oleifera</i> foi misturado em 100 mL de solução salina e completamente misturado a 500 rpm por 15 min em temperatura ambiente. A suspensão de sal coagulante foi filtrada.	David et al., 2016
Águas residuais suínas	Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	Amostras de 1 g, 2 g e 3 g de sementes moídas foram extraídas com 100 mL de água destilada. A mistura foi então filtrada.	Lo Monaco et al., 2010
Águas residuais de criação de gado leiteiro	Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i>	As sementes foram retiradas das vagens e secas em estufa a 45 °C por 24 horas. O extrato de <i>M. oleifera</i> foi preparado moendo 50 g de sementes em um litro de água destilada seguido de filtração. Dois métodos foram empregados: (1) 2 g de sementes moídas foram extraídos com solução de NaCl 1 mol/L (11,89 g em 200 mL de água); e (2) as vagens das sementes foram descascadas e trituradas, e o	Francisco et al., 2014
Águas residuais de criação de gado leiteiro	Sementes de <i>M. oleifera</i>	pó resultante foi peneirado através de uma peneira de 42 mm.	Junho et al., 2021
Águas residuais de criação de gado leiteiro	Sementes de <i>M. oleifera</i>	Os grãos de sementes secas foram moídos até virar um pó fino. Água foi adicionada ao pó para fazer uma suspensão de 2% (2 g de pó de <i>M. oleifera</i> em 100 ml de água). A suspensão foi agitada por 30 minutos e então passada por papel de filtro.	George et al., 2016
Águas residuais de cervejaria	Tanino vegetal	O tanino vegetal comercial Tanfloc foi usado como floculante. Este produto é derivado da lixiviação da casca da acácia negra <i>Acacia mearnsii</i> .	Junior et al., 2019
Extratos de chá verde	Sementes de <i>M.oleifera</i>	As sementes descascadas e moídas foram extraídas por Soxhlet com n-hexano de 98% de pureza por 8 h. Após a remoção da fração oleosa, as sementes em pó foram misturadas com água na proporção de 20 mL/g, e a mistura foi filtrada com um filtro de papel de 11 µm.	Bindes et al., 2019
Efluente de produção de	Amido de arroz	6 g de amido foram adicionados a 200 mL de	Teh et al., 2014a; Teh et

óleo de palma		água destilada. Esta mistura foi primeiramente autoclavada a 121 °C e 117 kPa por 20 min, e então mantida a uma temperatura constante de 80 °C com uma agitação de 400 rpm. A solução coagulante foi preparada misturando 50 g de sementes moídas com 1 L de solução de cloreto de potássio 1 M. A mistura foi agitada por 30 min e a solução foi filtrada a vácuo.	al., 2014b
Indústria de laticínio	Sementes de <i>M. oleifera</i>	Quiabo: para obter a mucilagem, as vagens foram moídas para produzir a goma necessária. 1,0 g de goma foi embebido em 100,0 ml de água e agitado por 1 hora. A mucilagem usada como coagulante foi obtida posteriormente por filtração da solução. Figo e Bridelia: 200 g das cascas de ambas as plantas foram embebidas em 2 litros de água por três dias.	Mateus et al., 2017
Indústria de processamento de mandioca	Quiabo (<i>Abelmoschus esculentus</i>), Figo (<i>Ficus exasperata</i>) e Bridelia (<i>Bridelia ferrugineae</i>)	A extração de <i>M. oleifera</i> foi realizada misturando 3 g de pó de semente com 0,1 L de cloreto de cálcio 0,5 M. A mistura foi agitada por 30 min a 100 rpm - denotada como solução extraída de <i>M. oleifera</i> (MOS). O MOS foi aquecido em micro-ondas e sonificado. A potência de micro-ondas e a intensidade ultrassônica também foram variadas dentro da faixa de 200 a 800 W e 20 a 100%, respectivamente. A mistura foi filtrada e seca em um forno de secagem a 60 °C.	Adewuyi e Adewumi, 2018
Efluente de produção de óleo de palma	<i>M. oleifera</i>	Coagulante à base de tanino extraído de <i>Acacia mearnsii</i> (TANAC, concentração de 25% p/p) Foram testados coagulantes naturais comerciais: Acquapol WW e Acquapol S5T (Acqua Química), Tanfloc SL e Tanfloc SG (Tanac S.A), todos extraídos da casca de <i>Acacia-negra</i> (<i>Acaciamearnsii</i>). As soluções dos coagulantes Tanfloc SL e SG foram preparadas pela dissolução de 2 g de coagulante em 50 mL de água. As soluções dos coagulantes Acquapol WW e S5T foram preparadas a partir de uma alíquota de 5 mL diluída em 50 mL de água.	Noor et al., 2021
Indústria de laticínio	Tanino vegetal	Extrato: o coagulante de <i>M. oleifera</i> foi preparado moendo 5 g de sementes descascadas em um moinho e depois mexendo este pó com 100 mL de uma solução salina por 30 min. Então, o coagulante foi obtido por filtração a vácuo do extrato.	Justina et al., 2018
Indústria de processamento de mandioca	Coagulantes naturais comercializados (Acquapol WW, Acquapol S5T, Tanfloc SL e Tanfloc SG)	Coagulante magnético: quantidades pré-determinadas de nanopartículas (50 ou 100 mg) foram adicionadas a 20 mL de extrato de <i>M. oleifera</i> e	Dos Santos et al., 2018
Águas residuais de limpeza de laticínios	Extrato de sementes de <i>M. oleifera</i> e nanopartículas de óxido de ferro funcionalizadas com extrato de <i>M. oleifera</i>		Triques et al., 2020

1.4.8 MECANISMOS DE COAGULAÇÃO EM COAGULANTES NATURAIS

Coagulantes naturais podem ser obtidos a partir de plantas, animais e microrganismos. Os principais mecanismos envolvidos na coagulação com coagulantes vegetais incluem adsorção e neutralização de carga, ou, alternativamente, adsorção e formação de pontes. Definir o mecanismo exato é um desafio, pois esses fenômenos podem ocorrer simultaneamente (Sapana e Sonal, 2012; Poumaye et al., 2012). A adsorção e neutralização de carga referem-se à interação entre duas partículas com cargas opostas, enquanto a formação de ponte ocorre quando um coagulante fornece uma cadeia polimérica que sorve partículas (Miller et al., 2008). Esses dois mecanismos estão presentes nas propriedades coagulantes de coagulantes vegetais (Bolto e Gregory, 2007; Miller et al., 2008).

Amran et al. (2018) abordam em detalhes como os coagulantes à base de plantas promovem a coagulação de poluentes em águas residuais. Na neutralização de carga, um polímero ionizável (presente no coagulante) estabiliza as partículas coloidais, que, de outra forma, se repeliriam devido à carga negativa. Na adsorção de polímeros, polímeros de cadeia longa se ligam parcialmente à superfície das partículas coloidais devido à afinidade entre elas. As partes não ligadas constituem a principal estrutura envolvida na formação de ligações ou pontes. A ponte facilita a formação de flocos de poluentes, diminuindo a repulsão entre partículas. Dosagens adequadas de coagulantes fornecerão a quantidade necessária de polímero para promover uma ponte de polímero robusta.

Vieira et al. (2010) avaliaram o potencial de adsorção do coagulante de *M. oleifera* para cor, turbidez e remoção de DQO em águas residuais da indústria de laticínios. A adsorção máxima dos componentes em soluções aquosas ocorreu utilizando 1 g/L de sementes de *M. oleifera*, com um tempo de agitação de 60 minutos, o que indicou uma excelente afinidade entre estes componentes e o sorvente. Além disso, o coagulante de *M. oleifera* demonstrou capacidade de adsorção em uma faixa de pH entre 5 e 8.

Real-Olvera et al. (2015) investigaram a adsorção de poluentes orgânicos em águas residuais de matadouros utilizando *M. oleifera* como coagulante natural.

Os resultados mostraram que 180 minutos são necessários para alcançar alta adsorção. A capacidade máxima de adsorção, de 0,523 g DQO/g de pó, indica uma boa afinidade entre os poluentes orgânicos e o pó de semente. O pó de semente apresentou capacidade de sorção em uma faixa de pH entre 5 e 9, com os melhores resultados obtidos em níveis elevados de pH.

1.4.9 BENEFÍCIOS DO USO DE COAGULANTES NATURAIS

Os coagulantes naturais apresentam vantagens em relação aos coagulantes químicos em termos de biodegradabilidade, não corrosividade e menor ou nenhuma toxicidade (Fig. 1.5) (Okuda et al., 2001, Okuda et al., 1999; Villaseñor-Basulto et al., 2018). Essas características são atraentes para o desenvolvimento de tratamentos de água e esgoto mais sustentáveis, nos quais os custos de processamento são reduzidos enquanto a remoção de cor e turbidez é aprimorada (Poumaye et al., 2012). Além disso, o lodo gerado durante o processo de coagulação é inócuo e apresenta um volume de 4 a 5 vezes menor do que o lodo produzido com o uso de sulfato de alumínio ou cloreto férrico (Vieira et al., 2010; Abaliwano et al., 2008). Ademais, os coagulantes naturais não alteram significativamente o pH do meio (Abaliwano et al., 2008) e não causam problemas de corrosão (Ghebremichael, 2005).

FIGURA 1.5 - VANTAGENS DOS COAGULANTES NATURAIS SOBRE OS COAGULANTES QUÍMICOS.



FONTE: O autor (2025).

Embora a eficiência seja um dos fatores mais críticos no tratamento de água e esgoto, outros critérios são igualmente relevantes para a confiabilidade a longo prazo de coagulantes de origem vegetal. No tratamento de efluentes, a sustentabilidade envolve a integração de aspectos ambientais, sociais, econômicos e técnicos (Kamali et al., 2019) (Fig. 1.6).

FIGURA 1.6 - CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE NO TRATAMENTO DE EFLUENTES.



FONTE: O autor (2025).

1.4.10 ASPECTOS ECONÔMICOS DE COAGULANTES NATURAIS A BASE DE PLANTAS

Os coagulantes químicos são amplamente utilizados no tratamento de águas residuais devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e alta disponibilidade. No entanto, esses coagulantes não são sustentáveis devido às concentrações residuais de alumínio presentes após o tratamento (Nimesha et al., 2022; Dayarathne et al., 2021).

Os coagulantes à base de plantas apresentam como vantagens a biodegradabilidade, não toxicidade e não corrosividade (Rocha et al., 2020). Além disso, esses coagulantes reduzem o volume de lodo gerado, assim como os custos de manuseio e tratamento, devido à natureza biodegradável dos resíduos do tratamento de água (Nimesha et al., 2022). Segundo Othmani et al. (2020), os sistemas de tratamento de águas residuais provavelmente substituirão os coagulantes químicos por alternativas de origem vegetal, devido ao baixo custo, aplicação multifuncional, biodegradabilidade e fontes abundantes desses coagulantes.

Diante da emergência climática, do esgotamento dos recursos naturais e da ampla degradação ambiental, os coagulantes de origem vegetal estão em sintonia com as iniciativas globais de desenvolvimento sustentável (Vijayaraghavan e Sivakumar, 2011). O avanço de tecnologias sustentáveis favorecerá a ampliação do uso desses coagulantes, reduzindo os custos de produção com o aumento da escala. Ademais, os coagulantes vegetais se tornarão progressivamente mais competitivos à medida que o desempenho superior no tratamento de águas residuais, evidenciado na literatura científica, seja aplicado na indústria (Yin, 2010).

Embora existam muitos estudos sobre a eficiência de coagulantes de origem vegetal no tratamento de águas residuais, especialmente na indústria alimentícia, são extremamente raras as comparações diretas de custos de produção e preços finais entre coagulantes naturais e químicos. Conforme apontam Vijayaraghavan e Sivakumar (2011) e Yin (2010), o preço atrativo do coagulante de *M. oleifera* em relação a outros coagulantes naturais decorre das reconhecidas vantagens dessa planta e de sua ampla aplicação em variados sistemas de tratamento de efluentes.

Uma única árvore de *M. oleifera* produz aproximadamente 2000 sementes por ano, capazes de tratar 6000 L de água com uma dosagem de 50 mg/L (Kansal e

Kumari, 2014). Quando totalmente madura, a produção dessa árvore pode chegar a 20.000 sementes, quantidade suficiente para tratar 60.000 L de água anualmente (Kansal e Kumari, 2014). Segundo um estudo realizado pela Water and Environmental Health London e Loughborough (WELL) (Folkard et al., 1999), uma árvore de *M. oleifera* com uma média de produção de 3 kg de sementes pode tratar 30.000 L de efluente a uma dosagem de 100 mg/L. Em uma área de aproximadamente 1 hectare, seria possível colher 3000 kg de sementes, quantidade suficiente para tratar 30.000 m³ de água (Kansal e Kumari, 2014).

Os custos de produção da semente de *M. oleifera* variam conforme diversos fatores, como o rendimento da colheita, condições climáticas e práticas agrícolas. Para efeito de comparação, em 1994, o custo da semente de *M. oleifera* no Malawi era de US\$ 7,5 para tratar 1000 m³ de água, enquanto o custo do alumínio e do carbonato de sódio era de US\$ 49,8 (Sutherland et al., 1994). Já na Malásia, em 2006, o custo de produção de 1 kg de *M. oleifera* era de aproximadamente US\$ 2, o que representa o dobro do custo do alumínio (Katayon et al., 2006).

Os principais obstáculos para a precificação e comercialização de coagulantes de origem vegetal incluem: (a) produção agrícola insuficiente para viabilizar o processamento em larga escala; (b) variações sazonais na disponibilidade de matéria-prima; (c) baixa demanda de mercado; (d) conhecimento limitado e estágio de desenvolvimento inicial de: métodos economicamente viáveis de extração, condições adequadas de armazenamento e preservação, e parâmetros ótimos para o tratamento de águas residuais; (e) uso industrial restrito; (f) déficit de conscientização e interesse no mercado; (g) concorrência com um mercado bem estabelecido de coagulantes químicos; e (h) ausência de regulamentação e controle de qualidade específicos para extratos vegetais (Ang e Mohammad, 2020; Choy et al., 2014; Nimesha et al., 2022; Ahmad et al., 2021).

Embora a relação custo-benefício dos coagulantes vegetais atualmente favoreça seu uso em pequena escala e na pesquisa acadêmica, há potencial para expansão com o apoio das partes interessadas (Kansal e Kumari, 2014; Vijayaraghavan e Sivakumar, 2011). Órgãos reguladores governamentais e não governamentais poderiam implementar regulamentações ambientais que incentivem o uso de coagulantes naturais nas indústrias, oferecendo benefícios como reduções fiscais e linhas de crédito facilitadas para subsidiar os custos de implementação (Freitas et al., 2008; Ahmad et al., 2021). Ademais, é essencial o avanço de

pesquisas para identificar os coagulantes naturais de maior potencial econômico e industrial (Nimesha et al., 2022).

1.4.11 AVANÇOS RECENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS PARA COAGULANTES DE ORIGEM VEGETAL NO TRATAMENTO DE ÁGUA

1.4.11.1 Plantas com capacidade de coagulação além da *Moringa oleifera*

Othmani et al. (2020) investigaram a eficiência da *M. oleifera*, do cacto, do quiabo e da manga na remediação de água doce e águas residuais. Segundo os autores, as plantas analisadas não apenas pertencem a famílias distintas, mas também apresentam capacidades coagulantes que variam de acordo com a parte da planta utilizada como fonte dos agentes coagulantes. As partes exploradas foram as sementes no caso da *M. oleifera* e da manga, as vagens de sementes para o quiabo e o cladódio para o cacto. A eficácia coagulante desses materiais está relacionada ao tipo de agente ativo extraído (como polissacarídeos, proteínas ou ambos), o que resulta em diferenças na eficiência de remoção de contaminantes entre as espécies estudadas.

Thakur e Choubey (2014) registraram uma redução de 80,7% na turbidez ao tratar água turva sintética utilizando *M. oleifera*, enquanto o quiabo alcançou uma taxa de remoção de 78,7%. Kazi e Virupakshi (2007) mostraram que as sementes de *M. oleifera* reduziram a turbidez e a DQO do efluente de curtume em 82% e 83%, respectivamente. Já a mucilagem do cacto apresentou eficiência de remoção de 78,5% para a turbidez e 80,6% para a DQO. Qureshi et al. (2011) relataram que a manga reduziu a turbidez em 98%, comparada a 86% alcançados pela *M. oleifera*. Embora pesquisas anteriores indiquem que as proteínas sejam os principais compostos coagulantes ativos em plantas, Seghosime et al. (2017) sugerem que o alto teor de carboidratos (76,73%) nas sementes de manga também pode contribuir para a atividade coagulante dessas plantas.

Dessa forma, a exploração e o estudo de biomateriais para a remediação de águas e efluentes representam uma oportunidade para incorporar os princípios de sustentabilidade e tecnologia limpa nos sistemas de tratamento (Othmani et al., 2020).

1.4.12 PROCESSO INTEGRADO DE TRATAMENTO

Uma abordagem integrada é uma estratégia eficaz para aumentar a utilização de coagulantes naturais, combinando-os com outras tecnologias de tratamento. Esse método permite alcançar os objetivos do processo ao aproveitar os pontos fortes de cada técnica, enquanto reduz suas limitações (Ang e Mohammad, 2020). Um exemplo é a integração de uma etapa de coagulação (utilizando coagulantes naturais) com um tratamento biológico. Hameed et al. (2016) aplicaram um coagulante à base de tanino na etapa de coagulação, precedendo o tratamento biológico. Essa combinação resultou na redução da carga orgânica, proporcionando economia devido à menor demanda por aeração. Pavon-Silva et al. (2009) também demonstraram que a associação entre coagulação e tratamento biológico alcançou taxas de remoção de DQO de até 99% no tratamento de efluentes da indústria alimentícia. Esses resultados evidenciam que os coagulantes naturais podem aprimorar a eficiência das etapas subsequentes de tratamento.

Um outro exemplo de abordagem integrada é a combinação da coagulação com sistemas de membrana, que ajuda a reduzir a tendência à incrustação (Jiang et al., 2015). A quitosana, empregada como coagulante natural, demonstrou melhorar o desempenho da membrana de nanofiltração frente à matéria orgânica, neutralizando cargas e diminuindo a repulsão eletrostática, principal fator de incrustação (Ang e Mohammad, 2019). Além disso, a integração da coagulação com a eletrólise aprimorou a qualidade do sobrenadante, promovendo a degradação de compostos orgânicos no efluente, o que o torna apto para descarte em corpos d'água (Ang e Mohammad, 2020). Assim, processos integrados que combinam coagulação com outras tecnologias elevam a qualidade do efluente tratado, possibilitando um descarte seguro.

Coagulantes naturais podem ser utilizados tanto em etapas de pré-tratamento quanto de pós-tratamento, contribuindo significativamente para a eficiência global do processo (Ang e Mohammad, 2020).

1.4.13 MELHORIA NA EXTRAÇÃO E PURIFICAÇÃO DE COAGULANTES NATURAIS

Diferentemente dos coagulantes químicos, nos quais as características de qualidade são rigorosamente controladas, o controle de qualidade dos coagulantes naturais representa um desafio. Essa particularidade está relacionada à obtenção dos coagulantes, que podem ser extraídos de diversas fontes e por diferentes métodos. Para contornar essa limitação e produzir um coagulante natural de alta pureza, é necessário aprimorar o processo de extração. O método de extração mais simples utiliza apenas água. No entanto, a eficácia dessa técnica costuma ser insatisfatória. Esse problema pode ser resolvido ao otimizar o processo de extração e adicionar uma etapa de purificação.

A eficácia de coagulação pode ser potencializada com o uso de soluções salinas (como NaCl e CaCl₂) durante o processo de extração (Carvalho et al., 2016; Megersa et al., 2019). Megersa et al. (2019) observaram que a aplicação de soluções salinas (NaCl, KNO₃ e NH₄Cl) elevou a eficiência na remoção de turbidez da *M. oleifera* de 37%, utilizando extração com água, para 91%. Esse resultado pode ser explicado pela teoria de Debye-Hückel (Ang e Mohammad, 2020). Os sais incrementam a solubilidade das proteínas ao romperem as ligações proteína-proteína nos coagulantes naturais (Megersa et al., 2019), propiciando maior quantidade de compostos ativos com capacidade de coagulação nos coagulantes extraídos com soluções salinas (Ang e Mohammad, 2020; Megersa et al., 2019).

A presença de resíduos orgânicos no coagulante extraído é indesejável, pois favorece o crescimento bacteriano e serve como substrato para a formação de subprodutos (Jensil et al., 2012). Assim, é necessário purificar os coagulantes naturais extraídos. O método de purificação mais comum envolve a remoção da fração oleosa do extrato coagulante utilizando solventes, como hexano e etanol (Megersa et al., 2019). A redução no conteúdo de lipídios melhora a eficiência na remoção de turbidez e DQO, uma vez que os óleos prejudicam o processo de coagulação, adicionando impurezas à água tratada (Ang e Mohammad, 2020). Embora essa purificação aumente o desempenho do coagulante natural, o extrato pode ser refinado ainda mais, resultando em um produto final com maior concentração de compostos ativos de coagulação. Para isso, diversos métodos de purificação estão sendo avaliados, como precipitação química, diálise, liofilização,

ultrafiltração e troca iônica (Dezfooli et al., 2016; Baptista et al., 2017; Sanchez-Martín et al., 2010; Choudhary e Neogi, 2017).

Sánchez-Martín et al. (2010) analisaram o efeito da purificação por cromatografia de troca iônica no desempenho da coagulação da *M. oleifera*. A dosagem ideal de coagulante em uma única etapa de eluição foi o dobro da necessária para o coagulante purificado em duas etapas.

Devido ao elevado custo da cromatografia de troca iônica, pesquisadores têm explorado métodos alternativos de purificação (Ang e Mohammad, 2020). Um exemplo disso é a precipitação química utilizando sulfato de amônio para purificar o extrato (Dezfooli et al., 2016; Choudhary e Neogi, 2017). Choudhary e Neogi (2017) relataram que o extrato de *M. oleifera* isolado com 30–60% e 60–80% de sulfato de amônio saturado aumentou a eficiência na remoção de turbidez, quando comparado ao uso de alumínio. Esse estudo indica que um processo de purificação simples, mas eficaz, pode resultar em coagulantes naturais com maior capacidade de coagulação.

1.4.14 MODIFICAÇÃO NOS COAGULANTES NATURAIS PARA MELHOR DESEMPENHO

Os coagulantes naturais possuem algumas limitações que podem dificultar sua aplicação industrial, como baixa solubilidade em água, ponto isoelétrico desfavorável, baixa estabilidade, estreita faixa de pH para atuação, carga superficial fraca e eficiência moderada (o que resulta em maior dosagem necessária e custos elevados) (Lee et al., 2012; Thakur e Choubey, 2014). Grupos funcionais reativos (como hidroxila, amino e carboxila) presentes nos coagulantes naturais podem induzir modificações que ajudam a resolver essas limitações (Ang e Mohammad, 2020; Nimesha et al., 2022). Um estudo investigou a incorporação de compostos valiosos por meio da interação com esses grupos funcionais, com o objetivo de melhorar os aspectos negativos dos coagulantes naturais. Em geral, reações químicas como copolimerização por enxerto, reticulação com aldeído, esterificação, eterificação, aminação, carboxialquilação, hidroxialquilação e condensação foram aplicadas para aprimorar as propriedades dos coagulantes naturais (Gao et al., 2007).

A carboximetilquitosana quaternizada é uma forma modificada de quitosana utilizada em processos de coagulação. Ao adicionar grupos carboximetil e incorporar grupos de amônio quaternário (cloreto de (3-cloro-2-hidroxipropil)-trimetilamônio) na estrutura da quitosana, o ponto isoelétrico da quitosana é alterado de 6,0–6,5 para valores superiores a pH 9, o que amplia sua aplicação em efluentes alcalinos e águas residuais (Dong et al., 2014). Além disso, a solubilidade em água da quitosana modificada é significativamente aumentada. A combinação de maior solubilidade em água, ponto isoelétrico elevado e grupos funcionais com maior carga positiva aprimora a eficácia da quitosana modificada na remoção de contaminantes, quando comparada à quitosana não modificada e aos coagulantes químicos.

Huang et al. (2017) observaram que a carga positiva do amido pode ser aumentada pela incorporação de grupos de sal de amônio quaternário (cloreto de (2-metacriloiloxietil) trimetilamônio) na estrutura do polímero de amido. Uma carga positiva elevada é desejável em coagulantes, pois a maioria das partículas coloidais suspensas possui carga superficial negativa. No estudo de Huang et al. (2017), uma baixa dosagem (0,5–0,7 ppm) de amido modificado como coagulante resultou em taxas de remoção de até 98%.

Yang et al. (2018) adicionaram um grupo ditiocarboxila ao grupo funcional OH presente na quitosana, originando a quitosana xantada. Os autores observaram que o cobre (um metal pesado) e o caulim (associado à turbidez) foram eficientemente removidos. A adição de grupos funcionais quelantes de metais pesados em coagulantes naturais possibilita a eliminação de íons de cobre, cromo e níquel coexistentes por meio do mecanismo de quelação (Sun et al., 2019).

Além das modificações químicas e da busca por métodos eficientes de extração e purificação, os coagulantes naturais podem ser combinados com outros tipos de coagulantes (normalmente químicos) (Lee et al., 2012; Zhao et al., 2021), conforme demonstrado no tópico 1.4.5.

1.4.15 VIABILIDADE DOS COAGULANTES NATURAIS

Coagulantes naturais (sejam eles modificados ou não modificados) que apresentem resultados promissores em ensaios laboratoriais devem ser avaliados em aplicações em escala piloto e industrial. É fundamental analisar a viabilidade industrial desses coagulantes, considerando seu desempenho, custos e aspectos

técnicos. Adicionalmente, deve-se investigar o uso de coagulantes de origem vegetal em comunidades rurais e de baixa renda, uma vez que esses coagulantes podem ser produzidos localmente. Ferramentas de controle de qualidade também podem ser implementadas para padronizar e aprimorar o processo de produção (Ang e Mohammad, 2020; Kansal e Kumari, 2014; Freitas et al., 2008).

1.4.16 SUSTENTABILIDADE DOS COAGULANTES NATURAIS

A análise de critérios de sustentabilidade (ambientais, econômicos e sociais) será essencial para esclarecer dúvidas relacionadas aos coagulantes naturais. Para competir com os coagulantes tradicionais, é necessário assegurar um fornecimento contínuo de matérias-primas para a extração e produção desses coagulantes. Realizar um estudo econômico detalhado, que inclua os custos de matérias-primas, processos de extração e purificação, é crucial para determinar sua viabilidade financeira. Examinar os impactos ambientais e à saúde associados aos coagulantes naturais, especialmente os modificados, pode gerar oportunidades significativas.

Além disso, a aplicação da avaliação do ciclo de vida pode identificar meios para aprimorar o processo de coagulação utilizando agentes naturais. Por fim, uma abordagem fundamentada em conceitos de economia circular e bioeconomia pode promover o desenvolvimento sustentável e o aprimoramento dos coagulantes naturais empregados no tratamento de águas residuais (Ang e Mohammad, 2020; Kansal e Kumari, 2014; Oladoja, 2015; Freitas et al., 2008).

1.4.17 CONCLUSÕES

Embora os resultados promissores sobre coagulantes de origem vegetal no tratamento de águas residuais da indústria alimentícia sejam amplamente relatados, ainda há um número considerável de lacunas nesse campo de pesquisa. Por exemplo, poucos trabalhos detalham os mecanismos subjacentes ao processo de coagulação promovido por coagulantes naturais, enquanto a avaliação da eficácia de materiais vegetais em diferentes tipos de águas residuais e em combinações de coagulantes permanece em estágio inicial. Estudos abordando os aspectos econômicos dessa aplicação são notavelmente raros. Apesar dessas possibilidades de avanço, a literatura científica atual apresenta resultados significativos:

- a) Coagulantes à base de plantas são eficientes para remoção de turbidez e poluentes;
- b) Embora a purificação não seja obrigatória, ela é frequentemente usada para evitar um aumento na concentração de matéria orgânica após o tratamento de águas residuais;
- c) Alta eficiência de custo e baixa toxicidade estão entre as vantagens fundamentais dos coagulantes à base de plantas, tanto como coagulantes únicos quanto como auxiliar de coagulação;
- d) A utilização de coagulantes naturais para tratar águas residuais da indústria alimentícia tem sido limitada à pesquisa acadêmica. Esses estudos devem ser ampliados, dado o alto potencial dos coagulantes naturais em tecnologias ambientais sustentáveis;
- e) Entre os fatores que impedem o uso de coagulantes naturais estão o cultivo limitado de plantas com propriedades coagulantes e a falta de regulamentação que especifique a qualidade dos extratos coagulantes processados;
- f) *M. oleifera* é a fonte mais pesquisada de coagulantes à base de plantas. Os resultados demonstrados para a *M. oleifera* podem ser empregados para otimizar as condições do processo para esta espécie ou podem ser usados como um ponto de partida para a investigação de outras espécies de plantas.

A utilização de coagulantes naturais pela indústria, em comparação aos coagulantes convencionais, ainda é limitada. No entanto, espera-se que estudos como este promovam uma adoção mais ampla de coagulantes naturais, destacando suas características e vantagens.

CAPÍTULO 2 – TRATAMENTO DE ÁGUA COM BAIXA TURBIDEZ UTILIZANDO MORINGA OLEIFERA LAM E CLORETO DE POLIALUMÍNIO (PAC)

O conteúdo deste capítulo foi publicado na Revista *Journal of Environmental Chemical Engineering* (<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111624>) - Fator de Impacto 7.4

RESUMO

Um coagulante natural extraído da *Moringa oleifera* utilizando solução salina (CaCl_2) foi combinado com policloreto de alumínio (PAC) para tratar água com baixa turbidez (10, 20 e 30 uT) em um sistema de flotação por ar dissolvido (FAD). O objetivo foi diminuir a dependência de coagulantes químicos no tratamento de água, considerando aspectos ambientais e de saúde. Foram realizados tratamentos em diferentes proporções (100% *M. oleifera*, *M. oleifera*:PAC 90:10, *M. oleifera*:PAC 80:20, *M. oleifera*:PAC 70:30% e 100% PAC), com análises de turbidez, cor aparente, alumínio residual, condutividade elétrica, absorbância em $\text{UV}_{254\text{nm}}$ e espectrometria de luminescência molecular (ELM) para avaliar a eficiência. O uso exclusivo de MO (20, 30 e 40 mg L^{-1} para águas com 10, 20 e 30 uT, respectivamente) apresentou desempenho inferior (remoção média de 66,5% para turbidez e 64,9% para cor) em comparação com 100% PAC (88,3% de remoção de turbidez e 93,1% de remoção de cor) e com a proporção *M. oleifera*:PAC 70:30 (79,2% de remoção de turbidez e 90,3% de remoção de cor). A combinação de MO e PAC não alterou o pH da água, enquanto dosagens de PAC entre 2–12 mg L^{-1} não elevaram a concentração residual de alumínio, mas aumentaram a remoção de compostos com absorbância em $\text{UV}_{254\text{nm}}$ em média 39,9%. Embora a *M. oleifera* isolada tenha desempenho limitado no tratamento de água de baixa turbidez (<30 uT), sua associação com PAC mostrou-se eficiente, segura e sustentável, particularmente na proporção de 70:30. A eficiência dos tratamentos MO:PAC na remoção de compostos orgânicos foi comprovada por ELM. Um aumento na proporção de PAC (30%) reduziu a intensidade de fluorescência nas regiões dominantes de compostos orgânicos. O ELM revelou-se uma ferramenta excelente para controle de qualidade, identificando alterações na configuração da matéria orgânica na água, especialmente no que diz respeito à presença de proteínas.

2.1 INTRODUÇÃO

O tratamento da água desempenha um papel crucial na proteção da saúde pública, na preservação do meio ambiente, no suporte a processos industriais e agrícolas, além de assegurar o fornecimento de água potável. Ele também promove o uso eficiente dos recursos hídricos e garante a conformidade com os regulamentos de qualidade da água. Sendo a água essencial para a sobrevivência no planeta, os métodos de tratamento de água estão estreitamente vinculados a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, com destaque para o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), e contribuindo significativamente para o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 10 (Redução das Desigualdades), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 14 (Vida na Água) e ODS 15 (Vida Terrestre) (Organização das Nações Unidas - ONU, 2023).

Nas estações de tratamento de água, coagulantes químicos à base de sais de alumínio são amplamente utilizados devido ao seu baixo custo e eficácia na coagulação de partículas coloidais (Daryabeigi et al., 2010). Contudo, o uso de coagulantes químicos requer um controle rigoroso sobre os resíduos inorgânicos presentes na água tratada e no lodo gerado. Conforme destacado por Yin (2010), após a solubilização do sal na água, o cátion liberado (por exemplo, Al^{3+}) é adsorvido pela camada sólida suspensa, resultando em uma elevada concentração de cátions no material sedimentado. O descarte inadequado desse lodo pode acarretar sérios problemas ambientais e de saúde pública, como a contaminação de flora e fauna aquáticas, odores desagradáveis e mortalidade animal (Lin et al., 2015). Além disso, estudos têm associado o consumo de água tratada com coagulantes à base de alumínio ao desenvolvimento de problemas neurodegenerativos, como a doença de Alzheimer, devido à presença de alumínio residual (Ang e Mohammad, 2020; Rajendran et al., 2015; Yang et al., 2010).

Os coagulantes naturais oferecem riscos reduzidos à saúde humana e ao meio ambiente. Estes coagulantes são biodegradáveis, apresentam menor toxicidade, não são corrosivos e geram menor volume de lodo (Kansal e Kumari, 2014; Saleem et al., 2020; Balbinoti et al., 2023). Estudos aplicados sobre coagulantes naturais impulsionam o desenvolvimento de tratamentos de águas residuais mais eficientes e sustentáveis (Oladoja, 2015; Oladoja, 2016).

Pesquisas sobre coagulantes naturais frequentemente analisam a possibilidade de substituição parcial ou total de coagulantes químicos em sistemas de tratamento de água (De Paula et al., 2014; Ghebremichael et al., 2009; Nonfodji et al., 2020; Shak e Wu, 2015). É importante destacar que coagulantes naturais (em substituições de 100%) podem não alcançar a mesma eficácia que os coagulantes inorgânicos no tratamento de águas com baixa turbidez (<30 uT) (Kwaambwa et al., 2010; Skaf et al., 2021; Zaid e Ghazali, 2019). Gaikwad e Munavalli (2019) verificaram que o aumento da dosagem de MO resultou em maior turbidez residual ao tratar água com turbidez inferior a 12 uT. De forma semelhante, Franco et al. (2017) identificaram uma redução na eficiência de remoção de turbidez (de 54,5% para 32,2%) ao utilizar MO para tratar água com turbidez de 20 uT, empregando concentrações de 100,0 a 500,0 mg L⁻¹. Ainda assim, os diversos benefícios oferecidos pelos coagulantes naturais não podem ser desconsiderados.

Para aproveitar as vantagens dos coagulantes naturais sem comprometer a eficiência do tratamento, eles podem ser combinados com coagulantes inorgânicos (Mohd-Salleh et al., 2019; Oladoja, 2015; Oladoja, 2016). Essa combinação reduz a dependência de coagulantes químicos e, por consequência, minimiza os impactos ambientais negativos dos sistemas de tratamento de água (Mohd-Salleh et al., 2019; Oladoja, 2016). Apesar disso, poucos estudos avaliaram a eficiência dessa abordagem, especialmente para o tratamento de água com baixa turbidez. Níveis baixos de turbidez inicial (<40 uT) são frequentemente observados em represas de rios que fornecem água doce para áreas urbanas, após o devido tratamento. Embora o uso de coagulantes naturais, incluindo 100% de *M. oleifera*, seja bem documentado para águas com turbidez acima de 100 uT, o tratamento de água com baixa turbidez apresenta desafios, pois os coagulantes naturais não alcançam a mesma eficiência.

Valverde et al. (2015) utilizaram coagulantes combinados (12,5 mg L⁻¹ de PAC com 50 mg L⁻¹ de *M. oleifera*) para tratar água com turbidez inicial de 72,9 UT. Os resultados mostraram eficiências de remoção de 97,1% para cor aparente, 95,8% para turbidez e 85,6% para compostos detectados em UV_{254nm}. Saboia et al. (2020) também associaram *M. oleifera* (170 mg L⁻¹) com PAC (50 mg L⁻¹) no tratamento de água para consumo humano, com turbidez inicial de 11,9 UT, obtendo 99,8% de remoção de turbidez e 86,2% de remoção de cor. García-Fayos et al. (2015) investigaram o uso combinado de *M. oleifera* e PAC (15 mg L⁻¹ e 20 mg L⁻¹, respectivamente) para tratar água com turbidez inferior a 6 uT, reduzindo a turbidez inicial em até 90%. No entanto, os autores concluíram que o extrato de *M. oleifera* não contribui para a remoção de turbidez em águas com turbidez inicial muito baixa, como as avaliadas. Nenhum desses estudos utilizou o método de FAD.

É importante destacar que a eficiência dos coagulantes naturais está intimamente ligada ao método de extração das proteínas (Ang e Mohammad, 2020; Oladoja et al., 2015; Villaseñor-Basulto, 2018). As proteínas podem ser extraídas utilizando água ou soluções salinas (Kansal e Kumari, 2014). Embora o uso de solução aquosa seja uma abordagem mais simples, sua eficiência tende a ser menor devido à presença de impurezas que não possuem propriedades coagulantes (Ang e Mohammad, 2020). Em contrapartida, extrações realizadas com soluções salinas, como NaCl, KNO₃, KCl, NaNO₃ e CaCl₂, demonstraram melhores propriedades coagulantes (Carvalho et al., 2016; Valverde et al., 2013; Baptista et al., 2017;

Camacho et al., 2017). Esse desempenho superior é geralmente atribuído à maior concentração de proteínas solúveis na solução (Oladoja, 2015; Oladoja, 2016).

Megersa et al. (2019) identificaram que o uso de soluções salinas, como NaCl, KNO₃ e NH₄Cl, melhorou a eficiência de coagulação de coagulantes naturais, como *M. stenopetala* e *Maerua subcordata*. Segundo os autores, a remoção mais eficaz de turbidez (91%) foi alcançada com o uso de NaCl a 0,5 M para a extração do coagulante. Em contrapartida, Carvalho et al. (2016) destacaram que o coagulante extraído de *M. oleifera* com CaCl₂ apresentou desempenho superior na remoção de turbidez em relação ao solvente NaCl, o que pode ser explicado pela participação dos íons cálcio no processo de coagulação.

É importante destacar que a CF permanece como o método tradicional empregado para a redução de turbidez, cor e microrganismos patogênicos em água potável (Skaf et al., 2021). Embora a FAD seja amplamente aplicada em contextos industriais para a remoção de sólidos suspensos, óleos e outros contaminantes de águas residuais, há uma lacuna considerável no uso combinado de CF e FAD para enfrentar desafios específicos relacionados às águas de baixa turbidez. Esses desafios incluem a baixa concentração de partículas suspensas, que dificultam tanto a formação de flocos quanto o desempenho do coagulante (Yao et al., 2014; Zhao et al., 2021; Zhao et al., 2012). A maioria dos estudos científicos voltados ao tratamento de águas de baixa turbidez com coagulantes combinados foca exclusivamente na coagulação-floculação ou em sua associação com métodos como membranas, mas não na FAD (Li et al., 2023; Rashid et al., 2023; Lopes et al., 2020).

Este capítulo tem por objetivo avaliar a eficiência de um coagulante natural (MO extraída com CaCl₂) combinado com um coagulante químico (PAC) no tratamento de água com baixa turbidez (10, 20 e 30 uT), utilizando o processo de coagulação seguido de FAD. A proposta busca diminuir a dependência de coagulantes químicos, garantindo o cumprimento das exigências legais de qualidade da água.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 ÁGUA DE ESTUDO

A água foi coletada de uma fonte de abastecimento reconhecida por sua baixa turbidez, situada na região metropolitana de Curitiba, Paraná. A água coletada foi ajustada a três níveis iniciais de turbidez: 10, 20 e 30 uT, por meio de diluições da água não tratada. O pH foi mantido dentro dos valores naturais (variando entre 7,5 e 8,0), e as amostras foram preservadas a uma temperatura de 20 °C.

2.2.2 PREPARO DOS COAGULANTES

As sementes de MO foram obtidas da Universidade Federal de Campina Grande (Paraíba, Brasil). Após serem descascadas e trituradas, as sementes foram transformadas em pó, o qual foi então peneirado usando uma malha 270 mesh. O pó peneirado foi misturado sob agitação (300 rpm por 30 minutos) com uma solução salina de CaCl_2 1 M (Beltran-Heredia e Sanchez-Martín, 2009). Posteriormente, o conteúdo foi filtrado utilizando papel de filtro (28 μm) e uma membrana de fibra de vidro (0,45 μm). As concentrações de coagulante natural utilizadas nos testes foram 10, 20, 30, 40 e 50 mg L^{-1} .

A solução de PAC foi fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) e apresentou as seguintes características: densidade de $1,26 \text{ g.cm}^{-3}$, concentração de Al_2O_3 de 10,53% (p/p) e basicidade livre de 64,25% (p/p). A solução foi preparada com uma concentração de 5 g.L^{-1} , conforme descrito por Zhan et al., 2010.

2.2.3 TESTES EXPERIMENTAIS

Os ensaios de tratamento de água foram realizados em duas fases. A primeira fase avaliou a eficácia da MO isoladamente, enquanto a segunda analisou sua eficácia em combinação com o PAC (*M. oleifera*:PAC). Ambas as fases foram realizadas em triplicata utilizando água de manancial com diferentes níveis de turbidez (10, 20 e 30 uT).

Na primeira fase, foram feitas análises de turbidez residual e cor para determinar a dosagem ideal do coagulante natural a ser utilizado na fase seguinte. Testes preliminares foram realizados com várias concentrações de extrato salino de *M. oleifera*: 10, 20, 30, 40 e 50 mg.L⁻¹. As dosagens mais eficazes de coagulante foram 20, 30 e 40 mg.L⁻¹ para água com turbidez de 10, 20 e 30 uT, respectivamente.

Na segunda fase, o PAC foi substituído por 10%, 20% e 30% de *M. oleifera* com o objetivo de aprimorar o desempenho do coagulante natural (Tabela 2.1). As proporções percentuais foram determinadas a partir de testes preliminares, visando equilibrar a eficiência com uma menor dependência do coagulante químico.

Os resultados obtidos na primeira e segunda fases foram comparados com o tratamento controle, realizado com 100% de PAC (nas dosagens de 20, 30 e 40 mg.L⁻¹ para água com turbidez de 10, 20 e 30 uT, respectivamente).

TABELA 2.1 - CONDIÇÕES DE TRATAMENTO.

Porcentagem (%)		Turbidez inicial (uT)	Dosagem M. <i>oleifera</i> :PAC (mg.L ⁻¹)
MO	PAC		
100	0	10	20:0
		20	30:0
		30	40:0
90	10	10	18:2
		20	27:3
		30	36:4
80	20	10	16:4
		20	24:6
		30	32:8
70	30	10	14:6
		20	21:9
		30	28:12
0	100	10	0:20
		20	0:30
		30	0:40

MO: extrato de *Moringa oleifera*; PAC: policloreto de alumínio.

Os testes foram realizados com o uso de um equipamento chamado Floteste (Nova Ética - modelo 218/3), que é composto por uma câmara de pressurização e

três jarros. Os parâmetros operacionais para a etapa de coagulação-floculação foram definidos conforme Carvalho et al. (2016): gradiente de mistura rápida de 1000 s^{-1} por 10 segundos, seguido por um gradiente de mistura lenta de 25 s^{-1} por 15 minutos. Após a floculação, a FAD foi aplicada sob as seguintes condições: pressão de saturação de 4 bar, tempo de saturação de 8 minutos, taxa de recirculação de 10% e velocidade de flotação de $5\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($72\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$).

2.2.4 EFICÁCIA DO TRATAMENTO

A eficácia dos tratamentos foi avaliada por meio dos seguintes parâmetros: turbidez (método nefelométrico, utilizando o turbidímetro Lovibond TurbiCheck), cor aparente (medida pela redução da intensidade da luz ao atravessar a amostra a 455 nm, com o espectrofotômetro UV-Vis da Global Trade Technology), pH (utilizando o pHmetro 1800 Gehaka), condutividade elétrica (com o Digital Conductivity Meter/Instrutherm CDR-870), concentração residual de alumínio (medida por DPD, método Colorimétrico 4500-G, DR 5000 HACH) e absorvância $\text{UV}_{254\text{nm}}$ (com o espectrofotômetro UV-Vis da Global Trade Technology). Todas as análises seguiram as metodologias descritas por Baird et al. (2017).

O comportamento da matéria orgânica antes e após os tratamentos foi examinado por ELM. As matrizes de excitação-emissão foram obtidas utilizando o espectrofluorímetro Cary Eclipse, com lâmpada de xenônio de 900 V. Para emissão e excitação, foram usadas fendas de cinco nanômetros, e cubetas de quartzo de 1 cm. Os espectros foram obtidos no modo de varredura de emissão em comprimentos de onda de 200–600 nm para emissão e excitação (Coble, 1996; Baghoth et al., 2011; Spencer et al., 2007).

2.2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para avaliar a normalidade da distribuição dos dados. Em seguida, as diferenças significativas entre as proporções dos coagulantes foram analisadas por meio da análise de variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95%. Por fim, o teste de Tukey foi utilizado para comparar as médias e verificar se existiam diferenças entre os coagulantes.

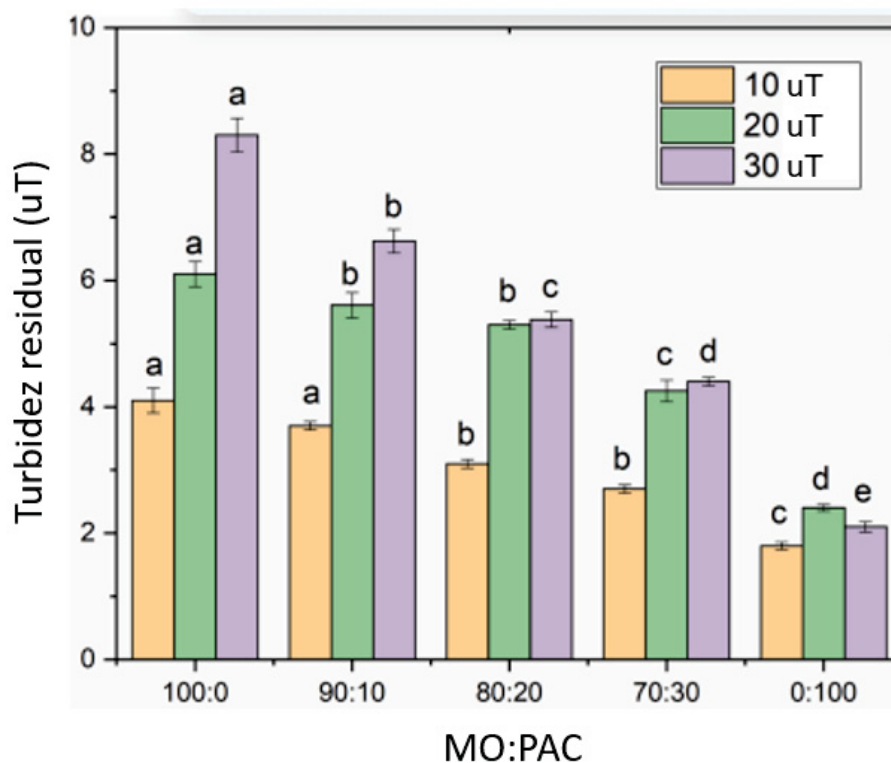
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 TURBIDEZ

Inicialmente, a água de manancial com turbidez inicial de 10, 20 e 30 uT foi tratada utilizando o coagulante natural (100% *M. oleifera*) nas concentrações de 20, 30 e 40 mg L⁻¹. Os resultados indicaram uma redução de turbidez variando de 58,7% a 72,1% (Fig. 2.1). Esses dados sugerem uma eficácia limitada do uso de *M. oleifera* isoladamente para tratar água com turbidez baixa (<30 uT). Resultados semelhantes foram observados por Kwaambwa et al. (2010), Ndabigengesere e Narasiah (1998) e Okuda et al. (2001). No entanto, outros estudos indicaram resultados contrários, mostrando remoções de turbidez em águas com até 60 uT (Ribeiro et al., 2019; Baptista et al., 2017; Camacho et al., 2017).

Ribeiro et al. (2019), Baptista et al. (2017) e Camacho et al. (2017) alcançaram reduções de turbidez de 98,0%, 89,7% e 85,0%, respectivamente, ao utilizarem *M. oleifera* nas dosagens de 5, 13 e 50 mg L⁻¹ para tratar águas com turbidez inicial de 25, 50 e 30–60 uT. As discrepâncias entre os estudos podem ser explicadas pelo método de extração do coagulante e pelas condições utilizadas. Ribeiro et al. (2019), por exemplo, extraíram proteínas de *M. oleifera* utilizando exclusivamente água deionizada, com o tratamento envolvendo uma filtração em linha com um filtro de areia (0,59 mm). Em contraste, Baptista et al. (2017) e Camacho et al. (2017) aplicaram técnicas de purificação para obter um coagulante natural mais eficiente: o primeiro utilizou fracionamento de proteínas, enquanto o segundo fez uso de extração de óleo de alta pressão, seguida pela extração de compostos ativos com etanol e NaCl. Contudo, o processo de purificação extensiva ou de etapas adicionais de processamento acarreta custos mais elevados, o que desestimula a utilização de coagulantes naturais.

FIGURA 2.1 - TURBIDEZ RESIDUAL EM DIFERENTES PROPORÇÕES DE MO:PAC.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas entre as concentrações de MO:PAC para cada nível de turbidez (teste de Tukey, $p < 0,05$).

*A turbidez máxima, de acordo com a regulamentação brasileira de águas (Portaria nº 2914 de 12/12/2011 e Portaria nº 5 de 28/09/2017), é de 5 UT.

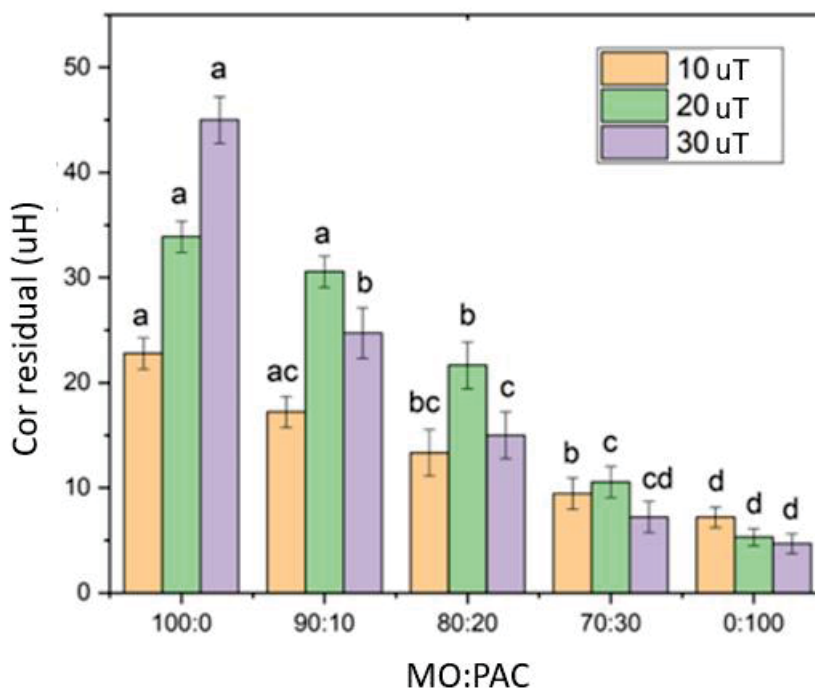
Considerando a remoção de turbidez obtida com o uso de *M. oleifera* isolado, diferentes proporções de *M. oleifera*:PAC foram avaliadas para verificar quais combinações poderiam otimizar o processo (Fig. 2.1). Para água com 10 uT, as melhores performances ($p < 0,05$) foram alcançadas nas proporções *M. oleifera*:PAC de 80:20 e 70:30. Por motivos de sustentabilidade, a proporção de 80:20 é recomendada para o tratamento de água com 10 uT de turbidez, pois requer uma quantidade menor de coagulante químico. Sob essas condições, obteve-se uma remoção de turbidez de 73,6%, representando um aumento de 25,4% em comparação ao tratamento realizado apenas com *M. oleifera*. Já para águas com turbidez inicial mais alta (20 e 30 uT), a proporção mais eficaz foi a de 70:30, que resultou em taxas de remoção de 78,9% e 85,1%, respectivamente. Esses valores são, respectivamente, 14,7% e 17,9% superiores ao tratamento com 100% *M. oleifera*. A combinação com o coagulante químico aumentou a eficiência de remoção de turbidez em relação ao uso exclusivo de *M. oleifera*, justificando sua aplicação em águas de baixa turbidez (< 30 uT).

O tratamento com 100% PAC resultou em uma remoção de turbidez de 82,8%, 88,5% e 93,7% para águas com turbidez de 10, 20 e 30 uT, respectivamente. Quando comparado ao tratamento com a combinação de 70:30, o uso de 100% PAC apresentou uma eficiência 9,7% superior. Esse resultado sugere que substituir 70% dos coagulantes químicos por alternativas naturais em sistemas convencionais de tratamento de água ocasiona pequenas variações no desempenho (menos de 10%), o que ainda é suficiente para atender aos padrões legais de qualidade da água. Como já mencionado, essa diminuição no uso de coagulantes químicos reduz os impactos ambientais e de saúde pública associados ao uso de coagulantes à base de alumínio, como a contaminação de ecossistemas aquáticos (Lin et al., 2015) e o aparecimento de doenças neurodegenerativas em humanos (Ang e Mohammad, 2020; Rajendran et al., 2015; Yang et al., 2010).

2.3.2 COR

A presença de cor na água pode ser causada pela presença de algas, matéria orgânica proveniente de atividades urbanas próximas aos mananciais e pelo processo de assoreamento resultante do uso e ocupação do solo (Sauniti et al., 2004; Bastos et al., 2017). As estações de tratamento de água têm a função de eliminar substâncias que causam coloração, garantindo o fornecimento de água potável à população. No presente estudo, o tratamento utilizando 100% de *M. oleifera* promoveu uma redução na cor da água de 60,9%, 64,7% e 69,2% para as três condições iniciais de turbidez avaliadas, ou seja, 10, 20 e 30 uT (Fig. 2.2). Os resultados revelam uma tendência: com o aumento da turbidez, a capacidade de redução da cor usando apenas a *M. oleifera* como agente coagulante também aumenta. Essa constatação reforça as limitações do uso exclusivo de coagulantes naturais no tratamento de águas com baixa turbidez. Para efeito de comparação, o tratamento com 100% de PAC causou uma redução de 87,65%, 94,61% e 97,09% na cor da água para turbidez de 10, 20 e 30 uT, respectivamente (Fig. 2.2).

FIGURA 2.2 - COR RESIDUAL EM DIFERENTES PROPORÇÕES DE MO:PAC PARA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE TURBIDEZ.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: Água com turbidez 10 UT, 20 UT e 30 UT apresenta cor inicial de $58,3 \text{ uH} \pm 2,2$, $98,3 \text{ uH} \pm 4,4$ e $161,7 \text{ uH} \pm 4,5$, respectivamente.

Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas (teste de Tukey, $p < 0,05$).

De acordo com Bodlund et al. (2014) e Yao et al. (2014), a presença de uma baixa concentração de partículas suspensas em água com baixa turbidez resulta em um contato limitado entre as partículas e o coagulante, o que prejudica a eficácia do processo de coagulação. Além disso, a decantação é pouco favorecida em águas com baixa turbidez, pois o número reduzido de partículas resulta em uma taxa de colisão baixa, o que dificulta a formação de flocos maiores (Yao et al., 2014; Zhao et al., 2021; Zhao et al., 2012). Essas características explicam a necessidade do uso de sistemas de FAD. A aderência das bolhas de ar aos flocos reduz sua densidade, permitindo que eles flutuem até a superfície, onde podem ser removidos (Justina et al., 2018). O uso de FAD neste estudo destaca-se em comparação com outras pesquisas que investigaram o uso combinado de coagulantes em águas com baixa turbidez. Lopes et al. (2020), por exemplo, avaliaram a remoção de turbidez utilizando FAD e sulfato de alumínio como coagulante. Segundo os autores, a FAD aumentou a eficiência do tratamento para águas com turbidez de 50 uT: a remoção de turbidez foi incrementada em cerca de 16% em 20 s^{-1} .

A remoção de cor foi mais eficiente quando se combinou *M. oleifera* com PAC, especialmente na proporção 70:30 (Fig. 2.2). Com essa combinação, o desempenho aumentou em média 39,4% em relação ao tratamento com 100% de MO. Ao comparar a cor inicial com a cor obtida após o tratamento (70:30), as taxas de remoção foram de 85,9%, 89,2% e 95,8% para águas com turbidez de 10, 20 e 30 uT, respectivamente. Os resultados alcançados são promissores e justificam o uso da mistura de coagulantes (*M. oleifera*:PAC) no tratamento de água com baixa turbidez, considerando o pequeno desvio médio (2,8%) quando comparado ao tratamento com 100% de PAC. Assim, é viável reduzir em até 70% a quantidade de coagulante químico, ao combiná-lo com a *M. oleifera*.

A combinação de *M. oleifera* com PAC foi, de fato, crucial para a remoção de cor. Conforme afirmado por Sharma et al. (2006), a coagulação geralmente ocorre por neutralização de carga, um processo em que o íon alumínio é hidrolisado de forma mais lenta, favorecendo a interação de cargas entre o coagulante e as partículas. Esse processo pode ter promovido uma interação mais eficiente entre o PAC e a rede formada pela *M. oleifera*, facilitando a remoção das outras substâncias presentes na água.

2.3.3 PH, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E RESIDUAL DE ALUMÍNIO

O pH da água não sofreu alterações após os tratamentos com *M. oleifera* (Tabela 2). Camacho et al. (2017), Awad et al. (2013) e Ndabigengesere e Narasiah (1998) também observaram que o coagulante à base de *M. oleifera* não impactou o pH da água após o tratamento. Os resultados deste estudo indicam que, além de ser utilizado isoladamente (*M. oleifera*), os coagulantes combinados (*M. oleifera*:PAC) também não alteram o pH da água, mantendo sua neutralidade. Assim, a mistura *M. oleifera*:PAC nas proporções de até 70:30 se mostrou mais eficiente do que o uso exclusivo de coagulantes químicos. Por outro lado, os tratamentos com 100% de PAC reduziram o pH da água em média 13,5%. Além disso, quanto maior a concentração de PAC, maior foi a redução no pH da água (Tabela 2.2). Segundo Koul et al. (2022), os coagulantes químicos geralmente atuam como ácidos em solução.

TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE TURBIDEZ ANTES E DEPOIS DOS TRATAMENTOS.

Turbidez (UT)	MO:PAC	Alumínio* (mg L ⁻¹)	pH*	Condutividade* (mS cm ⁻¹)
10	Água natural	0.03	7.7	0.17
	100:0	0.03	7.6	0.55
	90:10	0.03	7.6	0.49
	80:20	0.04	7.6	0.44
	70:30	0.04	7.7	0.40
	0:100	0.11	6.7	0.16
20	Água natural	0.04	7.5	0.17
	100:0	0.04	7.5	0.65
	90:10	0.04	7.4	0.62
	80:20	0.04	7.5	0.57
	70:30	0.05	7.5	0.53
	0:100	0.13	6.6	0.15
30	Água natural	0.05	7.6	0.17
	100:0	0.05	7.5	0.78
	90:10	0.05	7.6	0.75
	80:20	0.05	7.5	0.70
	70:30	0.06	7.5	0.64
	0:100	0.14	6.4	0.16

Legenda: MO: extrato de moringa oleífera; PAC: policloreto de alumínio.

*Os valores limites de acordo com a regulamentação brasileira (Portaria nº 2914 de 12/12/2011 e Portaria nº 5 de 28/09/2017) são: 0,2 mg L⁻¹ para alumínio, 6,0–9,5 para pH e 0,8 mS cm⁻¹ para condutividade.

Conforme Camacho et al. (2017), a manutenção de um pH estável resulta em uma diminuição nos custos, uma vez que a necessidade de adicionar produtos químicos para corrigir a acidez da água é eliminada. Dessa forma, o uso de coagulantes *M. oleífera*:PAC é incentivado sob os aspectos ambiental, econômico e operacional.

A concentração residual de alumínio foi semelhante entre a água tratada com *M. oleífera* (independente da concentração) e a água sem tratamento (Tabela 2.2). O alumínio residual é frequentemente encontrado na água potável devido à sua presença na fonte de captação e aos tratamentos que envolvem sais de alumínio. Como já foi mencionado, os resíduos de alumínio na água potável geram preocupações quanto à segurança, pois estão associados ao aumento do risco de problemas neurológicos (Ang e Mohammad, 2020; Rajendran et al., 2015; Yang et al., 2010). No presente estudo, a utilização de PAC em uma proporção de 10–30% não resultou em um aumento no alumínio residual da água tratada. Contudo, em experimentos realizados exclusivamente com PAC, a concentração de alumínio residual aumentou em média 27% em relação à água bruta. Assim, sob a ótica ambiental e de saúde pública, este estudo recomenda a utilização de MO:PAC em

estações de tratamento de água (principalmente para águas com baixa turbidez) como forma de minimizar os impactos do uso exclusivo de coagulantes químicos.

A condutividade elétrica das amostras de água tratadas com *M. oleifera* teve um aumento médio de 249,1%. Esse parâmetro está diretamente relacionado à quantidade de sais dissolvidos na água, na forma de íons, fornecendo, assim, uma estimativa do total de sólidos dissolvidos na água (Gandiwa et al., 2020). A condutividade foi significativamente influenciada pela dosagem do coagulante natural, apresentando uma forte correlação linear de R^2 0,99. Para concentrações de *M. oleifera* de 20, 30 e 40 mg L⁻¹, a condutividade elétrica variou de 0,17 mS.cm⁻¹ para 0,55, 0,65 e 0,78 mS.cm⁻¹, respectivamente. Um comportamento semelhante foi observado por Camacho et al. (2017) e Oliveira et al. (2011). Segundo Batista et al. (2017), o aumento na condutividade com a elevação da dosagem do coagulante natural é explicado pela maior concentração de proteínas presentes na solução salina de *M. oleifera*, resultante da adição de espécies iônicas junto ao extrato das sementes.

Os coagulantes combinados (*M. oleifera*:PAC) também elevaram a condutividade elétrica da água tratada (Tabela 2.2), embora o aumento médio tenha sido 14% inferior ao observado com *M. oleifera* isolada. Menores aumentos na condutividade foram observados quando a proporção de PAC foi maior e a de *M. oleifera* menor, com os valores mais baixos encontrados na proporção de 70:30. Esse resultado valida a escolha dessa proporção de coagulante para o tratamento de água com baixa turbidez (<30 uT). Em contraste, os testes realizados com 100% de PAC resultaram em uma redução média de 7,8% na condutividade elétrica (Tabela 2), o que pode ser atribuído ao extrato salino de CaCl₂.

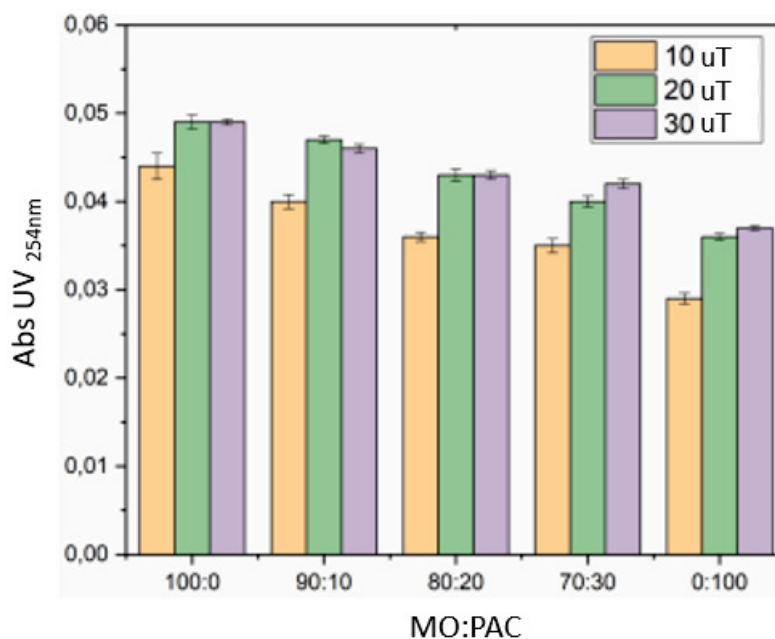
2.3.4 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica dissolvida nas amostras de água foi analisada por dois métodos: a absorbância em UV_{254nm} e as matrizes de excitação-emissão (EEM) obtidas por ELM (Zhou et al., 2016).

Neste estudo, os compostos com absorbância detectável em UV_{254nm} apresentaram uma redução média de 24,5% quando a *M. oleifera* foi utilizada isoladamente (Fig. 2.3). O bom desempenho da *M. oleifera* pode ser explicado pela baixa turbidez da água, pois os coagulantes naturais geralmente têm um

desempenho superior quando aplicados em águas com concentrações mais elevadas de substâncias húmicas, hidrofóbicas e de alto peso molecular, que contêm uma maior quantidade de compostos com absorbância em UV_{254nm} (Priya et al., 2018).

FIGURA 2.3 - RESIDUAIS COM ABSORBÂNCIA EM UV_{254nm} PARA ÁGUA COM DIFERENTES NÍVEIS DE TURBIDEZ EM DIFERENTES PROPORÇÕES DE MO:PAC.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: Água com turbidez de 10 UT, 20 UT e 30 UT exibe absorbância inicial em UV_{254nm} de 0,053, 0,065 e 0,072 cm⁻¹, respectivamente. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas (teste de Tukey, p < 0,05).

O emprego de *M. oleifera*:PAC resultou em um aumento médio de 39,9% no desempenho do tratamento, quando comparado ao uso exclusivo de *M. oleifera*, o que indica que o PAC potencializa a remoção de compostos orgânicos. No entanto, concentrações mais elevadas de PAC (20–30%) não provocaram alterações significativas nas taxas de remoção, sugerindo que dosagens menores são suficientes para esse fim. Nonfodji et al. (2020) também observaram uma remoção aprimorada de matéria orgânica quando MO e PAC foram combinados. O tratamento com 100% de PAC levou a uma redução média de 43,5% nos compostos com absorbância em UV_{254nm}, o que é 17,7% mais eficaz em comparação ao tratamento com a proporção 70:30 de coagulantes.

A ELM foi utilizada para identificar a matéria orgânica no meio aquoso, com base na absorção de radiação por espectroscopia de fluorescência em um comprimento de onda específico e a emissão dessa radiação em um comprimento de onda maior, encontrada em diversos compostos orgânicos e inorgânicos. Conforme Baghoth et al. (2011), a ELM é uma ferramenta eficaz para monitorar a remoção de compostos orgânicos.

Certas bandas, bem como picos de emissão e excitação, são característicos de compostos específicos, como, por exemplo: B (Tirosina/proteína; excitação de 220–235 nm; emissão de 310–320 nm), T (Tryptofano/proteína; excitação de 270–280 nm; emissão de 340–360 nm), A (Ácido fúlvico/substâncias húmicas terrestres; excitação de 320–350 nm; emissão de 400–450 nm) e C (Ácido húmico/substâncias húmicas terrestres; excitação de 330–390 nm; emissão de 420–500 nm) (Coble, 1996; Baghoth et al., 2011; Spencer et al., 2007).

Neste estudo, as amostras de água (com turbidez de 10, 20 e 30 uT) foram predominantemente compostas por substâncias não húmicas de baixa hidrofobicidade e massa molar, uma vez que picos de excitação foram observados na faixa de 200–225 nm, o que indica a presença de proteínas (Fig. 4). Conforme Spencer et al. (2007) e Coble (1996), substâncias húmicas apresentam picos de excitação a partir de 310 nm.

Quando a água foi tratada exclusivamente com *M. oleifera*, observou-se um aumento na intensidade de fluorescência nas regiões de 200–300 nm da matriz de EEM. Baptista et al. (2017) relataram que as frações proteicas de *M. oleifera*, que não demonstram potencial para coagulação-floculação, incluem glutelina, prolamina e proteínas insolúveis, todas localizadas dentro dessa faixa de EEM. Além disso, uma redução na intensidade foi detectada nas regiões EEM de 350–425 e 375–500 nm, o que pode estar relacionado à remoção preferencial de substâncias húmicas em relação a outros compostos proteicos.

Ao se utilizar coagulantes combinados, uma maior proporção de PAC resultou na diminuição da intensidade de fluorescência, principalmente nas regiões EEM de 250–400, 350–400 e 375–525 nm (Fig. 2.4). Embora todos os tratamentos tenham levado à redução da intensidade de fluorescência, a proporção MO:PAC 70:30 gerou os melhores resultados e, portanto, foi selecionada como a melhor opção de coagulante para o tratamento de água com baixa turbidez.

FIGURA 2.4 - ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E EMISSÃO POR ELM PARA CARACTERIZAR O TIPO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE NA ÁGUA.

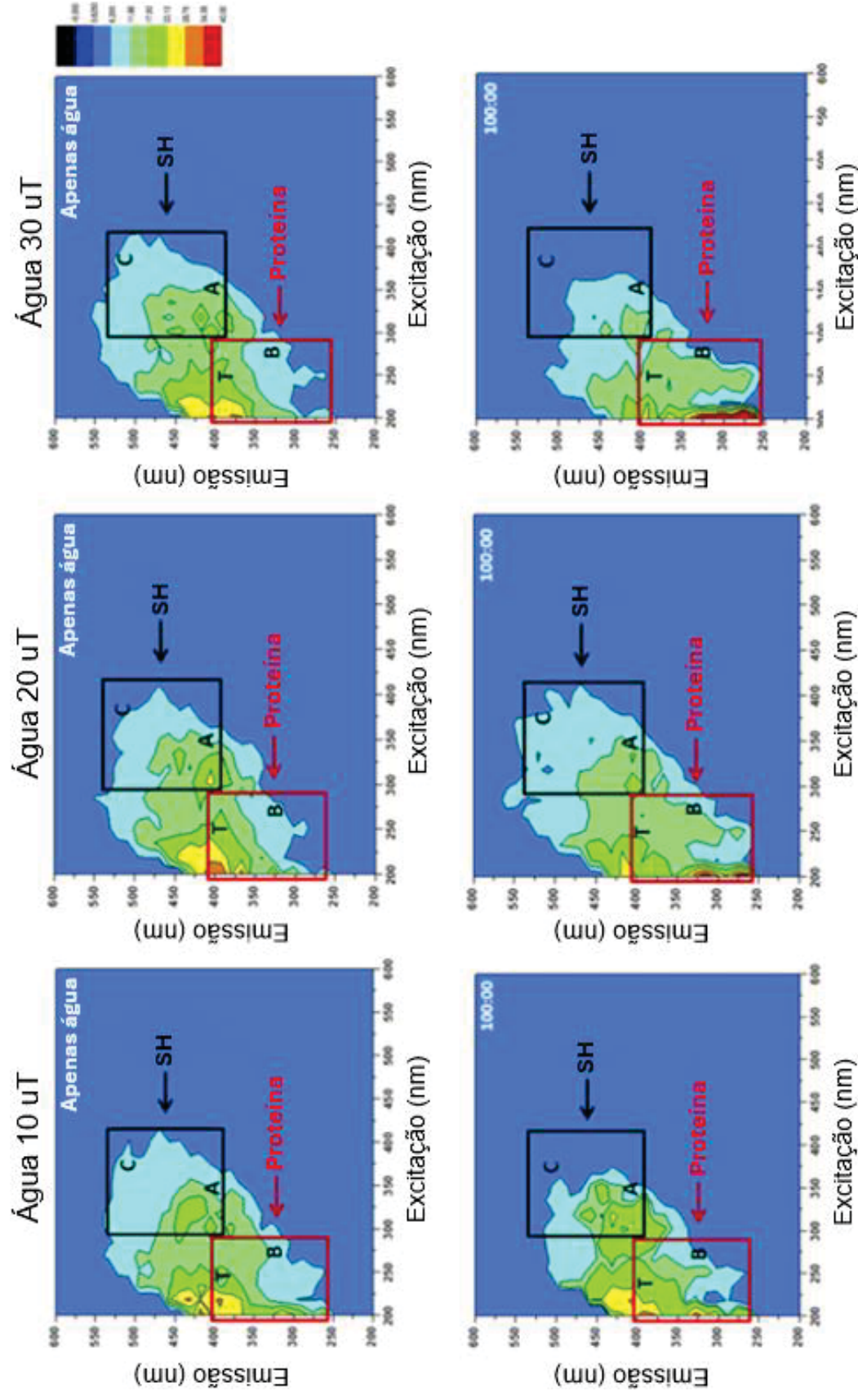


FIGURA 2.5 (continuação) - ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E EMISSÃO POR ELM PARA CARACTERIZAR O TIPO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE NA ÁGUA.

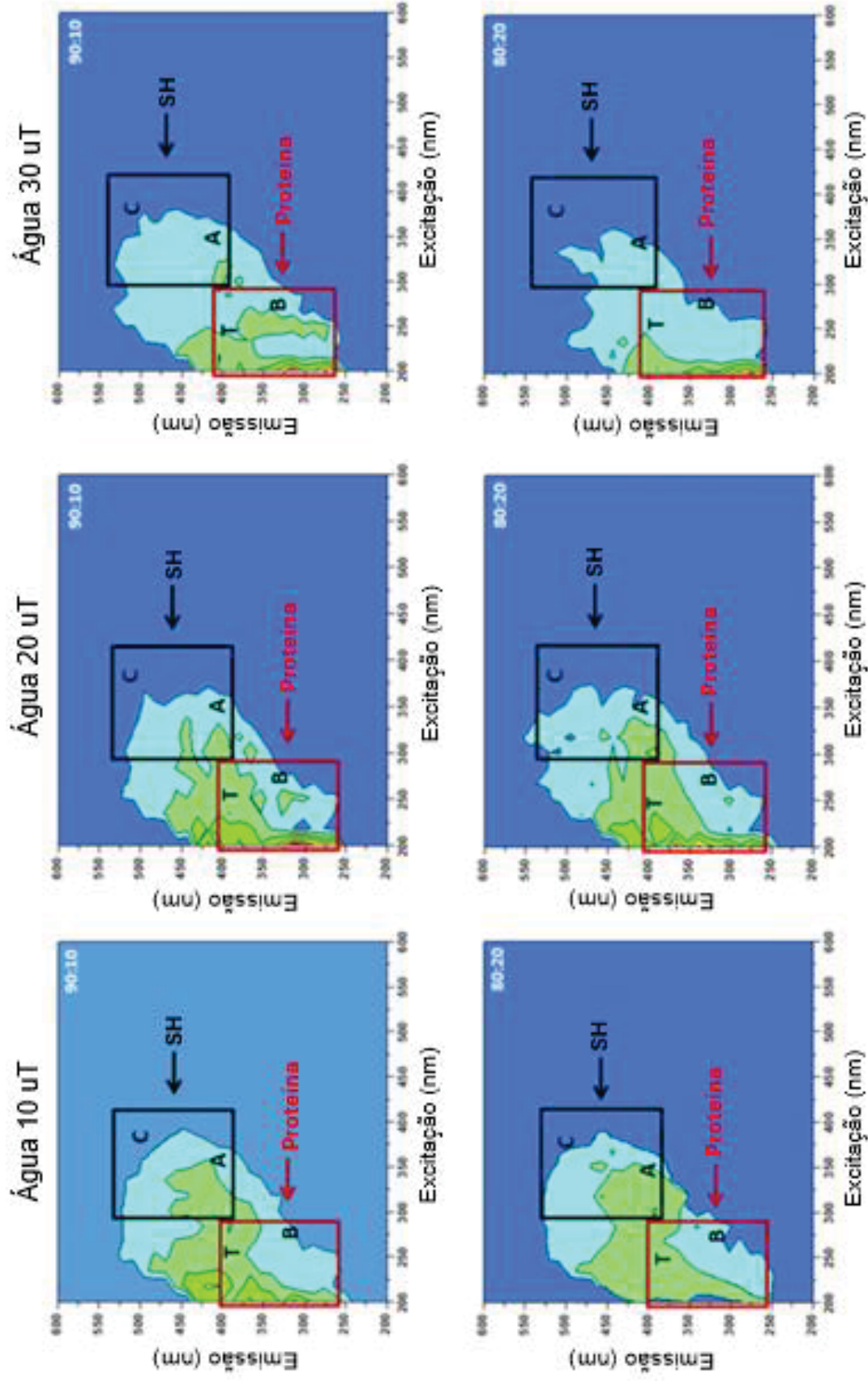
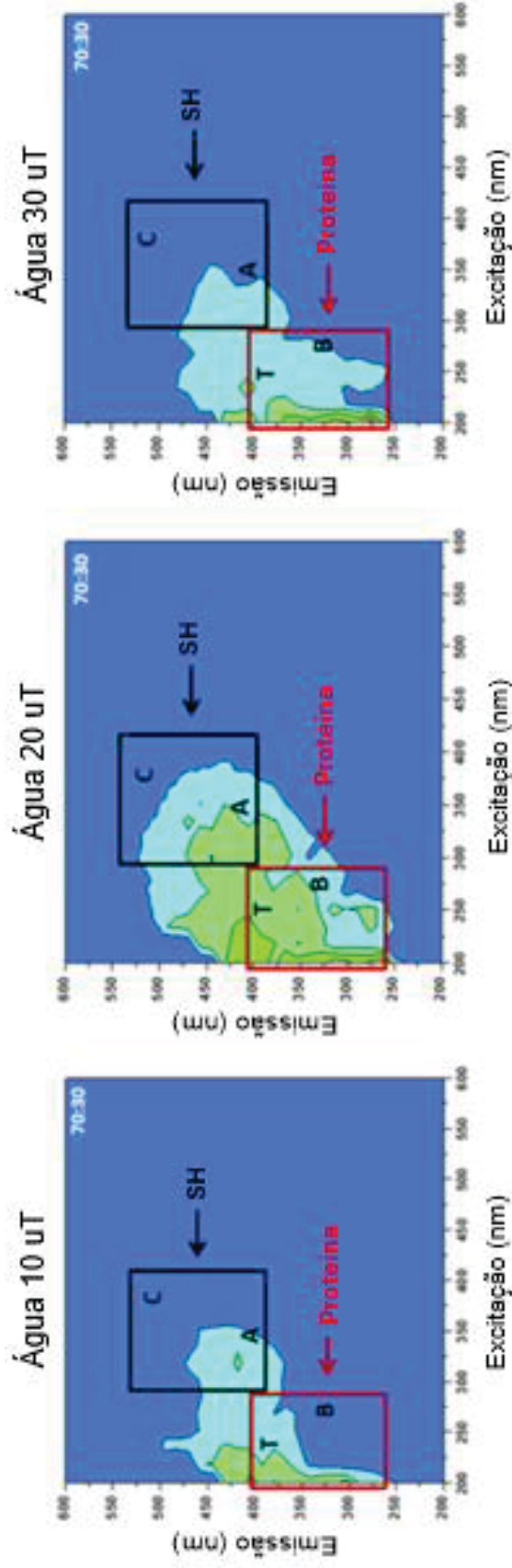


FIGURA 2.6 (continuação) - ESPECTROS DE EXCITAÇÃO E EMISSÃO POR ELM PARA CARACTERIZAR O TIPO DE MATÉRIA ORGÂNICA PRESENTE NA ÁGUA.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: A = Ácido fulvíco; B = Tirosina; C = Ácido húmico; SH = subs. húmicas; T = Triptofano.

2.4 CONCLUSÕES

Amostras de água com turbidez de 10, 20 e 30 uT tratadas com 100% *M. oleifera* nas dosagens de 20, 30 e 40 mg L⁻¹ apresentaram um aumento na condutividade elétrica (223,5–358,8%) e uma diminuição na turbidez (58,7–72,1%), na cor (60,9–69,2%) e nos compostos com absorbância detectável em UV_{254nm} (16,9–31,9%). Em contraste, os tratamentos realizados com *M. oleifera*:PAC nas proporções 90:10, 80:20 e 70:30 mostraram um desempenho superior, com maior redução na turbidez (73,6–85,1%), na cor (85,9–95,1%) e nos compostos com absorbância detectável em UV_{254nm} (33,9–41,7%). A interação aprimorada proporcionada pelo PAC resultou na formação de flocos maiores, com filamentos longos, que foram capazes de agregar maiores quantidades de elementos dissolvidos na água.

A combinação *M. oleifera*:PAC na proporção de 70:30 foi a mais eficaz para o tratamento de água com baixa turbidez (<30 uT), com reduções médias de 79,2% na turbidez, 90,5% na cor e 38,1% nos compostos com absorbância detectável em UV_{254nm}. Além disso, o uso do coagulante combinado *M. oleifera*:PAC possibilita a operação de sistemas tradicionais com uma redução de 70% no uso de coagulantes químicos, mantendo pequenas variações no desempenho (<10%).

É importante destacar que os coagulantes combinados não alteraram o pH da água nem aumentaram significativamente a concentração residual de alumínio após os tratamentos. Por isso, o uso combinado de *M. oleifera*:PAC se configura como uma alternativa viável para processos mais sustentáveis e seguros no tratamento de águas de baixa turbidez, pois reduz os riscos associados aos coagulantes à base de alumínio (como contaminação da fauna e flora e possíveis distúrbios neurológicos em seres humanos).

Com base nas conclusões promissoras, além dos desafios encontrados durante a pesquisa, foram identificadas algumas oportunidades para futuras investigações:

- Avaliar a eficiência do tratamento proposto em águas com predominância de substâncias húmicas e fúlvicas, considerando a presença de compostos aromáticos;
- Realizar sedimentação em amostras de água com baixa turbidez e cor, comparando a eficiência com tratamentos envolvendo FAD;

- Analisar a viabilidade econômica do uso combinado de MO e PAC para o tratamento de água.

CAPÍTULO 3 – COMBINAÇÃO DE COAGULANTES NATURAIS E SINTÉTICOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE PARBOILIZAÇÃO

O conteúdo deste capítulo está em fase de tradução para língua inglesa para posterior submissão.

RESUMO

Este estudo investiga a substituição do coagulante sintético Policloreto de Alumínio (PAC) por *Moringa oleifera* (MO) no tratamento de efluentes do processo de parboilização do arroz, visando um processo mais biodegradável, menos tóxico e alinhado à redução de impactos ambientais e riscos à saúde humana e aquática. A eficiência da MO foi avaliada isoladamente e em combinação com PAC, sendo que a associação MO:PAC não trouxe benefícios significativos. Os tratamentos com 100% MO e 100% PAC demonstraram elevada eficácia, com reduções superiores a 90% em parâmetros como cor, turbidez, sólidos, DBO, DQO, fósforo e nitrogênio. Além disso, os tratamentos reduziram em média 99,99% os microrganismos patogênicos (coliformes totais, *Escherichia coli* e *Bacillus cereus*) e 98,3% as bactérias mesófilas. Embora o PAC tenha apresentado maior eficiência para alguns parâmetros de qualidade, sua acidificação do meio e impacto ambiental destacam a MO como uma alternativa mais sustentável, acessível e menos tóxica, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3, 6, 12 e 14. Este estudo oferece uma solução econômica e sustentável para o tratamento de águas residuais, especialmente relevante para pesquisadores e profissionais da indústria alimentícia, em especial para regiões com recursos limitados.

3.1 INTRODUÇÃO

Os efluentes gerados pelo processo de parboilização apresentam elevados níveis de poluentes que, se não tratados adequadamente, podem causar danos ambientais e à saúde humana (Asati 2013; Mukherjee et al., 2016). Tradicionalmente, o tratamento desses efluentes envolve o uso de coagulantes sintéticos, como o policloreto de alumínio. No entanto, o uso excessivo desses coagulantes pode resultar em problemas ambientais e de saúde, como a geração de volumes de lodo não biodegradável e a possível associação ao desenvolvimento de doenças neurodegenerativas (Valverde et al., 2018; Balbinoti et al., 2023).

Nesse contexto, a busca por alternativas mais sustentáveis tem impulsionado o uso de coagulantes naturais, como a *M. oleifera*. A *M. oleifera* se destaca por suas propriedades coagulantes, devido à presença de proteínas catiônicas, que neutralizam as cargas das partículas suspensas, facilitando a agregação e sedimentação (Balbinoti et al., 2023). Esse conhecimento é tradicional e amplamente difundido, especialmente entre comunidades indígenas e ribeirinhas, que historicamente utilizam as sementes de *M. oleifera* para tratar a água (Jahn, 1988). A aplicação desse método em contextos industriais carrega um significado histórico e cultural, além de se apresentar como uma alternativa sustentável e

acessível para o manejo de recursos hídricos, com particular relevância em regiões remotas e com infraestrutura limitada (Pandey e Khan, 2022).

Estudos têm obtido sucesso no tratamento de águas residuárias usando *M. oleifera*. Rifi et al. (2023) demonstraram que a *M. oleifera* foi eficaz na redução de turbidez, sólidos suspensos, DQO, polifenóis e nitratos em efluentes de olive oil mill. Nzeyimana et al. (2024) confirmaram a eficiência deste coagulante natural para o tratamento de diferentes águas residuais, com redução média de 92% da turbidez. Elemile et al. (2021) e Junho et al. (2021) em efluentes de laticínios reforçaram o potencial da *M. oleifera* ao observarem, respectivamente, 86,42% de remoção de sólidos suspensos totais e 95% de remoção de turbidez. Embora os resultados sejam promissores, a aplicação industrial de *M. oleifera* ainda enfrenta incertezas relacionadas à variabilidade da composição das sementes, formação de subprodutos indesejáveis, instabilidade durante o armazenamento e à ausência de padronização, além de preconceitos como a preferência por coagulantes químicos convencionais e a percepção de baixa eficiência, que dificultam sua aceitação em larga escala. (Valverde et al. 2016; Balbinoti et al., 2024).

Uma abordagem promissora para superar esses desafios e melhorar a aceitação dos coagulantes naturais na indústria é a combinação de coagulantes sintéticos com naturais. Esta estratégia não só potencializa a eficiência do tratamento de efluentes, mas também promove um processo mais verde e econômico ao reduzir a quantidade de coagulantes sintéticos utilizados (Valverde et al. 2016; Elemile et al., 2021; Balbinoti et al., 2023). Ao equilibrar a alta performance dos coagulantes sintéticos com os benefícios ambientais dos naturais, essa associação representa um caminho viável para aplicações industriais (Jagaba e Hayder, 2020; Balbinoti et al., 2024). Valverde et al. (2018), por exemplo, constataram que a combinação de *M. oleifera*:PAC nas proporções de 80:20 ou 60:40 melhoraram os parâmetros de qualidade, como cor, turbidez e UV_{254nm}, permitindo a produção de água com padrões adequados de potabilidade. Balbinoti et al. (2024) observaram que a associação de *M. oleifera*:PAC na proporção 70:30 apresentou resultados superiores e estatisticamente equivalentes quando comparado aos tratamentos realizados com 100% *M. oleifera* e 100% PAC, respectivamente. Tais estudos evidenciam que a associação com *M. oleifera* é crucial para reduzir a quantidade necessária de coagulante sintético, como o PAC. Os benefícios em termos de saúde pública e ambiental tornam essa estratégia uma

solução competitiva em países em desenvolvimento, devido ao baixo custo e simplicidade, e em países desenvolvidos, por promover práticas sustentáveis e reduzir o impacto ambiental, mantendo a eficiência no tratamento (Gandiwa et al. 2020).

Apesar de seu enorme potencial, a combinação de coagulantes naturais e sintéticos no tratamento de efluentes de indústrias de alimentos ainda é uma área pouco explorada (Balbinoti et al., 2023). Diante dessa lacuna e da crescente necessidade de práticas mais sustentáveis no setor, este estudo propõe investigar a eficácia da associação das sementes de *M. oleífera* com o PAC no tratamento do efluente gerado pelo processo de parboilização.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 EFLUENTE DE ESTUDO

O efluente foi produzido em laboratório, utilizando as condições operacionais propostas por Balbinoti et al. (2017). Foi utilizado proporção mássica de 1:4 (m/v) de arroz em água destilada. A operação foi conduzida em banho termostático à pressão atmosférica, sem agitação do meio, em temperatura de 75 °C por 4 horas. O líquido resultante ao final do processo, denominado efluente, foi filtrado e mantido incubado a 10 °C até o momento das análises.

O efluente produzido foi caracterizado por meio dos seguintes parâmetros de qualidade: cor; turbidez; pH; alumínio dissolvido; DQO – demanda química de oxigênio; DBO – demanda bioquímica de oxigênio; SST – sólidos suspensos totais; ST – sólidos totais; SS – sólidos sedimentáveis; SDT - sólidos dissolvidos totais; P – fósforo total; e N – Nitrogênio Amoniacal. As análises foram realizadas em triplicata, de acordo com AWWA e WEF (2017).

3.2.2 PREPARO DOS COAGULANTES NATURAL E QUÍMICO

As sementes de *M. oleífera* foram secas, descascadas, trituradas e o pó obtido peneirado à 80 *mesh*. A solução de policloreto de alumínio (PAC) foi fornecida pela empresa Águas Guariroba da cidade de Campo Grande, Mato Grosso do Sul,

com as seguintes características: densidade de 1,34 g/cm; concentração de Al_2O_3 de 16,02%; e basicidade de 40,04%.

3.2.3 TESTES EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram estabelecidos com o objetivo de avaliar a eficiência do tratamento utilizando *M. oleifera* e sua associação ao PAC.

Baseando-se no estudo de Balbinoti et al. (2024), foram realizados testes preliminares com diferentes dosagens de *M. oleifera* (500, 1000, 2500 e 5000 mg/L), o que resultou na identificação da dosagem ótima de 2500 mg/L para o tratamento do efluente proposto. O parâmetro de definição para escolha da melhor dosagem foi a turbidez.

Buscando melhorar o desempenho do tratamento com 100% *M. oleifera*, a *M. oleifera* foi associada ao cloreto de polialumínio (PAC). As proporções percentuais *M. oleifera*:PAC utilizadas foram: 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 e 50:50. Essas proporções permitiram avaliar a eficiência do tratamento com a dependência do coagulante sintético. Os resultados foram comparados com o tratamento controle conduzido com 100% PAC (0,5 mL/L).

Os experimentos foram realizados no equipamento JarTest (Athon/JTAT3J1LDIG/Brasil), constituído por três jarros. Os parâmetros operacionais adotados foram estabelecidos com base no estudo de Mateus et al. (2017): gradiente de mistura rápida de 300 rpm for 2 min, seguido de mistura lenta com 100 rpm for 10 min e sedimentação de 60 min.

3.2.4 EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO

A eficiência das proporções percentuais de *M. oleifera*:PAC para o tratamento do efluente foi avaliada pelos parâmetros turbidez, pH e Absorbância ao $\text{UV}_{254\text{nm}}$. Todas as análises seguiram as metodologias propostas por AWWA e WEF, 2017.

Após a definição do melhor coagulante para o tratamento do efluente, o mesmo foi caracterizado por demais parâmetros de qualidade, como alumínio dissolvido; DQO – demanda química de oxigênio; DBO – demanda bioquímica de oxigênio; SST – sólidos suspensos totais; ST – sólidos totais; SS – sólidos

sedimentáveis; SDT - sólidos dissolvidos totais; P – fósforo total; e N – Nitrogênio Amoniacal. As análises foram realizadas em triplicata, seguindo as Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2017). Além disso, realizaram-se análises microbiológicas do efluente tratado para determinar a presença de Coliformes totais, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* e Bactérias mesófilas (Andrade et al., 2021).

3.2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O teste da análise de variância (ANOVA), com 95% de confiança, foi aplicado para avaliar as diferenças significativas entre os tratamentos. Por fim, foi realizado o teste de Tukey, de modo a comparar as médias e verificar se os coagulantes produzidos foram significativamente diferentes entre si.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

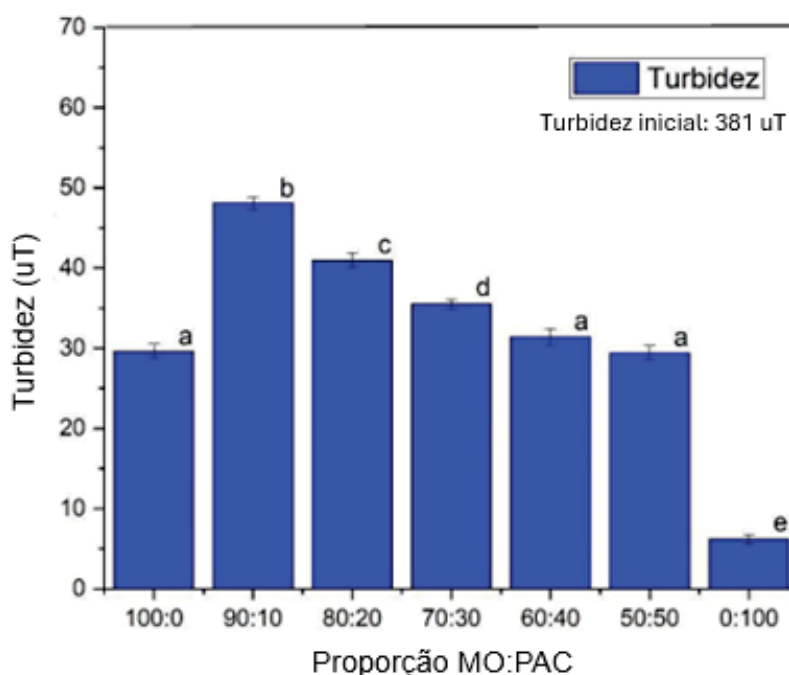
3.3.1 ASSOCIAÇÕES M. *OLEIFERA*:PAC NO TRATAMENTO DO EFLUENTE

3.3.1.1 Remoção de turbidez

O tratamento controle com PAC obteve uma redução de turbidez de 98,37%, enquanto a *M. oleifera* reduziu 92,22% (Figura 3.1). Esses resultados evidenciam a efetividade da *M. oleifera* na remoção de partículas suspensas do efluente, destacando-se, ainda, por dispensar etapas adicionais como a extração e purificação de proteínas, o que torna sua aplicação mais simples, prática e economicamente viável. De forma semelhante, Junho et al. (2021) relataram elevada eficiência da *M. oleifera* em sua forma bruta na redução da turbidez de águas residuárias, corroborando os achados deste estudo. Já Jagaba e Hayder (2020), ao empregarem a extração e purificação das proteínas coagulantes da planta, obtiveram uma redução de turbidez de 88,3%, valor comparável ao obtido neste trabalho mesmo sem o uso de processos mais elaborados, o que reforça a viabilidade do uso direto da *M. oleifera* como alternativa natural no tratamento de efluentes.

A comparação desses resultados sugere que o tratamento de efluentes do processo de parboilização pode ser realizado de forma eficiente utilizando apenas um preparo básico da *M. oleifera* (remoção das cascas, secagem e trituração). Essa abordagem simplificada é suficiente para alcançar uma remoção de turbidez superior a 90%.

FIGURA 3.1 - REMOÇÃO DE TURBIDEZ NAS ASSOCIAÇÕES *M. OLEIFERA*:PAC.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: as letras indicam grupos de médias estatisticamente diferentes ou iguais de acordo com o teste de Tukey ao nível de 95% de confiança.

Os dados reforçam as vantagens do uso da *M. oleifera* como coagulante natural, destacando sua biodegradabilidade e menor impacto ambiental em relação aos coagulantes convencionais. Esses fatores tornam a *M. oleifera* uma alternativa atraente para empresas que buscam e priorizam práticas sustentáveis, de baixo custo e com menor geração de resíduos químicos. No entanto, ao associar *M. oleifera*:PAC com o objetivo de maximizar a remoção de turbidez do coagulante natural e minimizar os impactos ambientais do coagulante sintético, os resultados indicaram que tais combinações não foram eficazes para o tratamento do efluente estudado (Figura 3.1). Esse resultado diverge do observado por Sabóia et al. (2020), que analisou o uso da *M. oleifera* no tratamento de um efluente proveniente da indústria sucroalcooleira, obtendo reduções significativas na turbidez.

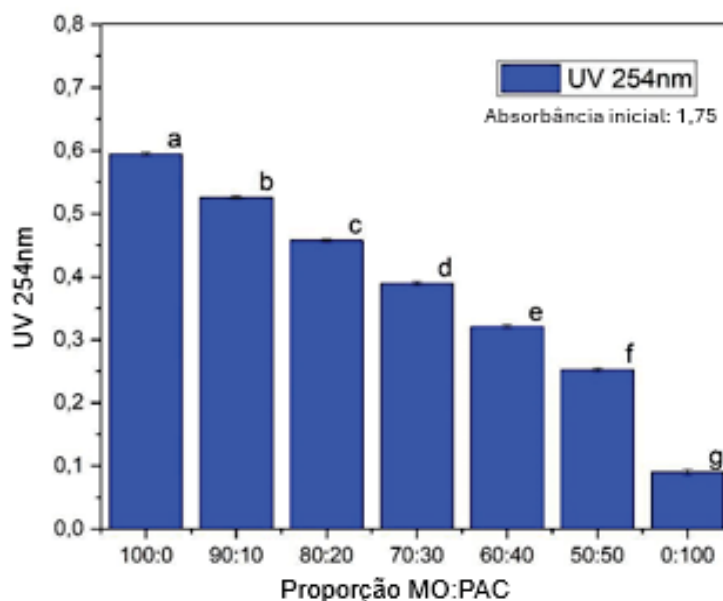
A diferença pode ser atribuída ao fato de que, neste estudo, a *M. oleifera* foi utilizada em sua forma integral, sem a extração das proteínas, o que parece ter limitado seu potencial coagulante quando associada ao PAC. Na associação, o desempenho da *M. oleifera* foi reduzido, requerendo concentrações mais elevadas de PAC (40 a 50%) para alcançar níveis de eficiência semelhantes ao obtido para o 100% MO (Figura 3.1). Isso indica que o uso da *M. oleifera* como coagulante natural, embora promissor, pode apresentar limitações nas associações com os coagulantes sintéticos, dependendo das características específicas do efluente e da forma de preparo do coagulante.

3.3.1.2 Remoção de Matéria Orgânica

A caracterização da matéria orgânica foi avaliada por meio da absorbância ao UV_{254nm}, um método eficaz para indicar a presença de compostos orgânicos, especialmente aqueles com estruturas aromáticas, como ácidos húmicos e fúlvicos (Balbinoti et al., 2024). Os valores de absorbância observados após os tratamentos refletem uma melhora na qualidade do efluente conforme a proporção de MO diminui em relação ao PAC (Figura 3.2).

O tratamento com 100% *M. oleifera* permitiu uma redução de 66,06% na absorbância, enquanto o tratamento com 100% PAC alcançou uma redução de 94,86%. Tendência similar foi observada em favor da presença do PAC nos estudos de Valverde et al. (2016), Sabóia et al. (2020) e Balbinoti et al. (2024). Esse comportamento sugere que o PAC, em relação a *M. oleifera*, possui uma capacidade de interação maior com os compostos aromáticos, promovendo uma adsorção mais eficaz da matéria orgânica.

FIGURA 3.2 - REMOÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS NAS ASSOCIAÇÕES M. OLEIFERA:PAC.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: as letras indicam grupos de médias estatisticamente diferentes ou iguais de acordo com o teste de Tukey ao nível de 95% de confiança.

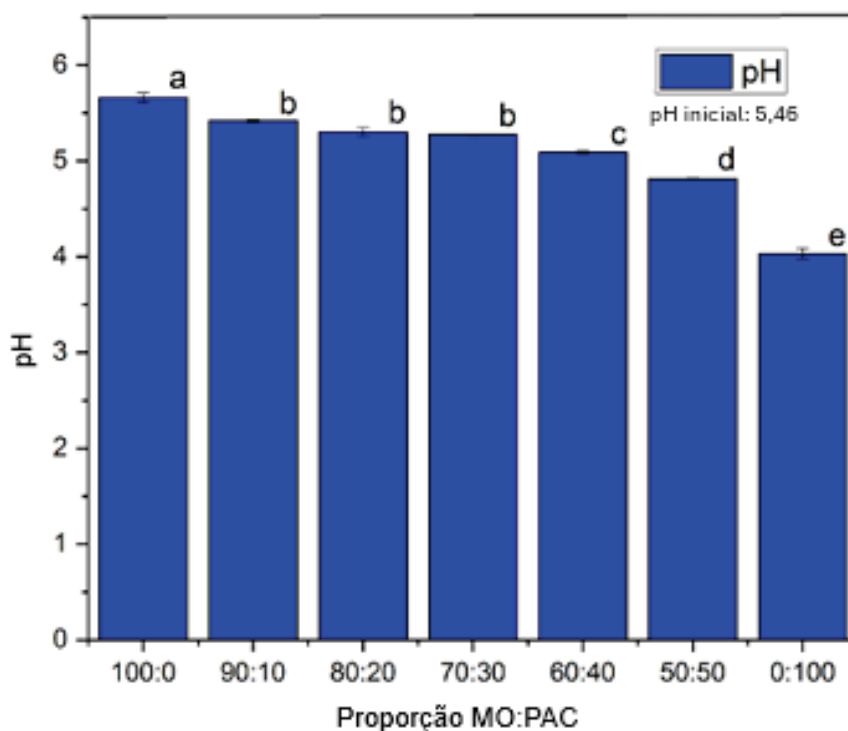
Embora o desempenho da *M. oleifera* seja inferior ao do PAC na remoção de matéria orgânica, esse resultado deve ser analisado em contexto. No tratamento de água para consumo humano, onde é exigida uma remoção quase total de compostos orgânicos para garantir a potabilidade, o PAC é preferível devido à sua maior eficiência. No entanto, para tratamento de efluentes, a remoção de matéria orgânica não requer um grau tão elevado de eficiência (Badawi et al., 2023).

Balbinoti et al. (2024) chegaram a conclusões semelhantes quando realizaram o tratamento isolado com *M. oleifera*. Os resultados obtidos por esses autores mostraram uma redução na absorbância ao UV_{254nm}, embora inferior à do PAC, similar aos achados neste estudo, onde o tratamento com 100% *M. oleifera* alcançou uma redução de 66,06% na absorbância. Esses pesquisadores também destacam as vantagens do uso da *M. oleifera*, especialmente no contexto de um tratamento mais sustentável, com coagulantes naturais, biodegradáveis e de baixa toxicidade. De forma análoga, os resultados aqui apresentados reforçam a viabilidade econômica da *M. oleifera*, especialmente em regiões com recursos limitados para a compra de produtos químicos industriais, como o PAC, e onde o cultivo local das sementes pode reduzir custos e a dependência de insumos externos.

3.3.1.3 pH

Na análise da variação do pH em função das diferentes proporções de *M. oleifera*:PAC, foi observado uma tendência com o aumento de PAC (Figura 3.3). Quando o tratamento foi realizado com 100% *M. oleifera*, o pH do efluente não apresentou diferença em relação ao pH inicial do efluente, indicando que, isoladamente, a *M. oleifera* não altera a acidez ou alcalinidade do meio. À medida que aumentou a proporção de PAC, foi observado uma redução do pH. Essa diminuição foi particularmente significativa quando o tratamento foi realizado com 100% PAC, onde houve redução de 26,13% no pH do efluente. Esse resultado indica que o PAC possui um efeito acidificante, reduzindo o pH do efluente a níveis que inviabilizam seu lançamento no corpo receptor. Em geral, as resoluções exigem que o pH dos efluentes a serem lançados esteja entre 5 e 9 (CONAMA nº 430/2011).

FIGURA 3.3 - pH DO EFLUENTE TRATADO NAS ASSOCIAÇÕES *M. OLEIFERA*:PAC.



FONTE: O autor (2025).

Legenda: as letras indicam grupos de médias estatisticamente diferentes ou iguais de acordo com o teste de Tukey ao nível de 95% de confiança.

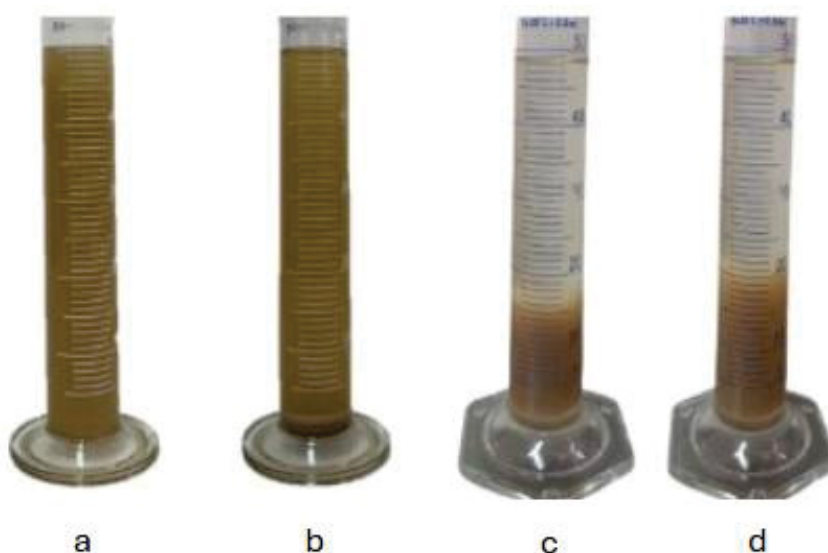
Embora o PAC seja eficaz para a redução de determinados contaminantes, seu uso isolado pode demandar um controle adicional do pH antes do descarte,

como a adição de neutralizantes. Por outro lado, a *M. oleifera* não altera o pH, o que torna este coagulante uma alternativa mais verde e barata.

3.3.3.2. Desempenho do Tratamento com 100% *M. oleifera* e 100% PAC

A caracterização do efluente bruto gerado pelo processo de parboilização em relação ao efluente tratado nas melhores condições (100% *M. oleifera* e 100% PAC) é de extrema importância para compreender os desafios específicos do tratamento e para avaliar a eficácia da solução proposta (Figura 3.4 e Tabela 3.1).

FIGURA 3.4 – CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO E TRATADO.



FONTE: O autor (2025).

LEGENDA: a - Efluente bruto sem sedimentação; b – Efluente bruto com sedimentação de 60 min.; c – efluente tratado com PAC; d – Efluente tratado com *M. oleifera*.

TABELA 3.1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO EFLUENTE ANTES E APÓS TRATAMENTOS COM MO E PAC.

Parâmetro	Efluente bruto	Tratamento com M. <i>oleifera</i>	Tratamento com PAC
Cor (Pt/Co)	179,20±1,96 ^a	16,25±0,81 ^b	11,57±0,58 ^b
Turbidez (uT)	381±9,05 ^a	29,60±1,48 ^b	6,19±0,31 ^c
pH	5,46±0,27 ^a	5,66±0,28 ^a	4,03±0,20 ^b
Alumínio Dissolvido (mg/L)	0,26±0,02 ^a	0,20±0,03 ^a	2,99±0,05 ^b
DQO (mg/L O ₂)	692,02±4,60 ^a	118,14±5,91 ^b	67,15±3,36 ^c
DBO (mg/L O ₂)	313±5,65 ^a	37,82±1,89 ^b	16,38±0,82 ^c
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	534±6,70 ^a	78,15±3,91 ^b	24,39±1,22 ^c
Sólidos Totais (mg/L)	1.252±12,60 ^a	145,78±7,29 ^b	33,16±1,66 ^c
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	2,50±0,12 ^a	0,29±0,01 ^b	0,09±0,01 ^c
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	734±6,70 ^a	84,19±4,21 ^b	33,75±1,69 ^c
Fósforo total (mg/L)	49,06±2,45 ^a	4,51±0,23 ^b	0,98±0,05 ^c
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	29,30±1,47 ^a	2,28±0,11 ^b	0,85±0,04 ^c

FONTE: O autor (2025).

Legenda: as letras, na mesma linha, indicam grupos de médias estatisticamente diferentes ou iguais de acordo com o teste de Tukey ao nível de 95% de confiança.

Após os tratamentos, reduções de cor superiores a 90% foram alcançadas, demonstrando a alta eficácia tanto do PAC quanto da *M. oleifera* no tratamento do efluente de parboilização. Em comparação, no estudo realizado por Mateus et al. (2017), a *M. oleifera* foi capaz de remover 53% da cor do efluente da indústria de laticínios, valor significativamente inferior ao obtido neste trabalho. Essa diferença pode estar relacionada às características distintas dos efluentes tratados, bem como às condições operacionais adotadas em cada estudo. Ainda assim, Mateus et al. (2017) destacaram o potencial da *M. oleifera* como uma alternativa sustentável e promissora, reforçando sua aplicabilidade mesmo em contextos com resultados numéricos mais modestos, o que vai ao encontro dos achados deste trabalho ao evidenciar a viabilidade ambiental do coagulante natural.

Quanto à turbidez, o efluente bruto apresentou alta concentração de partículas em suspensão, o que reforça a necessidade de um coagulante eficiente para a remoção dessas impurezas. Neste estudo, tanto o tratamento com *M. oleifera* quanto com PAC proporcionaram reduções de turbidez superiores a 92,22%, indicando alta eficiência de ambos os coagulantes. Resultados semelhantes foram reportados por Andrade et al. (2021), que observaram uma eficiência média de 92% na remoção de turbidez com o uso de *M. oleifera*, estatisticamente equivalente ao

coagulante sintético, o que corrobora os achados desta pesquisa. Por outro lado, Rifi et al. (2023) obtiveram uma eficiência um pouco menor, de 83%, com o uso da *M. oleifera*, resultado inferior ao observado neste estudo, possivelmente em função das características específicas do efluente tratado ou das condições operacionais. Já Gandiwa et al. (2020) concluíram que, embora os coagulantes naturais como *M. oleifera* e *Cactus Opuntia* apresentem eficiência de remoção de turbidez inferior ao coagulante sintético (sulfato de alumínio), ambos demonstraram potencial significativo de aplicação. Esses dados reforçam a relevância dos resultados obtidos neste trabalho, que demonstram o bom desempenho da *M. oleifera* mesmo em comparação com outros estudos da literatura.

No que se refere ao pH, o tratamento com *M. oleifera* não alterou o parâmetro, conforme também relatado por Andrade et al. (2021) e Balbinoti et al. (2024). Por outro lado, o tratamento com PAC reduziu o pH em 26,19%, resultado semelhante ao observado por Gandiwa et al. (2020). Esse efeito torna inviável o descarte do efluente tratado diretamente em corpos receptores sem uma correção prévia, evidenciando uma desvantagem ambiental e gerando custos adicionais associados ao uso de PAC.

Quanto à concentração de alumínio dissolvido, o efluente bruto e o tratado com MO apresentaram valores baixos, menores que 0,2 mg/L, alinhando-se aos resultados de Gerber et al. (2018). Em contrapartida, o tratamento com PAC aumentou em onze vezes a concentração de alumínio dissolvido, um impacto esperado devido à natureza do coagulante. Esse aumento representa um risco potencial aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana (Balbinoti et al., 2024).

A DQO encontrada neste estudo para o efluente bruto é comparável à reportada por Sayanthan e Thusyanthy (2018), que observaram valores de 630 mg/L, indicando uma carga significativa de matéria orgânica oxidável e, consequentemente, um elevado potencial poluente — o que reforça a necessidade de um tratamento eficiente antes do descarte em corpos hídricos, conforme também alertado por Gerber et al. (2018). A DBO obtida neste trabalho também se mostrou semelhante à relatada por Mukherjee et al. (2016), de 305 mg/L, o que evidencia a presença de compostos orgânicos que demandam elevada quantidade de oxigênio para sua degradação biológica. Após os tratamentos realizados, ambos os coagulantes testados neste estudo apresentaram alta eficiência, com reduções de DBO e DQO variando entre 82,92% e 94,77%. Esses valores se mostraram

superiores aos obtidos por Rifi et al. (2023), que reportaram uma redução de DQO de 57,6% com o uso de *M. oleifera*, e ligeiramente acima do desempenho observado por Nzeyimana et al. (2024), cujo estudo registrou uma redução de 88%. Tais comparações reforçam o bom desempenho da *M. oleifera* neste experimento, destacando sua efetividade mesmo em relação a outros estudos da literatura.

Os sólidos suspensos totais presentes no efluente bruto corresponderam aos valores encontrados por Sayanthan e Thusyanthy (2018) de 530 mg/L, apontando para uma alta carga de partículas sólidas em suspensão que podem prejudicar os corpos receptores em caso de não tratamento. Por sua vez, a concentração de sólidos totais foi similar ao estudo de Asati (2013), que obtiveram 1.100 mg/L, reforçando a necessidade de um tratamento eficiente para reduzir essa carga total. Além disso, a quantidade de sólidos sedimentáveis no efluente bruto sugere que, se não tratado adequadamente, tais sólidos podem se depositar no fundo dos corpos d'água, contribuindo para o assoreamento e prejudicando a fauna e flora aquática (Sayanthan e Thusyanthy, 2018). Após o processo de parboilização, os sólidos dissolvidos totais atingiram 734,0 mg/L, o que reflete uma alta quantidade de substâncias dissolvidas na água, inviabilizando o reuso industrial sem um tratamento preliminar (Asati, 2013; Gerber et al., 2018).

Após o tratamento com os coagulantes, obteve-se uma redução média de sólidos de 87,66% com *M. oleifera* e 96,15% com PAC, demonstrando a efetividade de ambos os coagulantes na remoção de sólidos totais do efluente. Embora o PAC tenha apresentado desempenho superior, os resultados obtidos com *M. oleifera* são expressivos, especialmente considerando sua natureza biodegradável e de baixo custo. Quando comparado ao estudo de Nzeyimana et al. (2024), que registrou uma remoção de 96% dos sólidos totais com *M. oleifera*, os valores deste estudo foram ligeiramente inferiores, o que pode estar relacionado às diferenças nas características dos efluentes tratados, como composição e concentração inicial de sólidos. Por outro lado, os resultados superam os encontrados por Rifi et al. (2023), que obtiveram uma redução de apenas 74,5% para sólidos suspensos, indicando que, sob determinadas condições, a *M. oleifera* pode atingir níveis de eficiência mais elevados, como os observados neste experimento. Além disso, a pesquisa de Elemile et al. (2021) reforça o potencial da *M. oleifera* como alternativa viável aos coagulantes sintéticos, ao relatar desempenho superior ao do sulfato de alumínio em termos de remoção de sólidos. Assim, os resultados alcançados neste estudo não

apenas corroboram a literatura, mas também fortalecem a viabilidade do uso de *M. oleifera* em contextos onde o uso de produtos químicos deve ser minimizado, evidenciando sua aplicabilidade como solução sustentável e eficaz no tratamento de efluentes.

Após os tratamentos com *M. oleifera* e PAC, ambos os coagulantes demonstraram elevada capacidade de remoção dos nutrientes analisados, com reduções médias de 91,51% para o fósforo total e nitrogênio utilizando *M. oleifera*, e 97,55% com PAC. Esses resultados reforçam o potencial desses coagulantes na mitigação de impactos ambientais associados à liberação de nutrientes em corpos hídricos. Um ponto crítico identificado foi a alta concentração de fósforo total no efluente bruto, com valor médio de 52,82 mg/L, comparável ao reportado por Queiroz et al. (1997), evidenciando a necessidade de um tratamento eficiente para prevenir a eutrofização — um processo que pode levar à proliferação excessiva de algas, redução do oxigênio dissolvido e degradação da qualidade da água, conforme já destacado por Faria et al. (2006). No caso do nitrogênio amoniacal, os níveis encontrados no efluente bruto situaram-se entre os valores relatados por Queiroz et al. (1997) e Faria et al. (2006), de 18,36 mg/L e 35 mg/L, respectivamente, reforçando o perfil poluente desse efluente.

Comparativamente, os resultados deste estudo são superiores aos obtidos por Faria et al. (2006), que, ao utilizar um sistema de absorção biológica estimulada em reator em batelada sequencial, não atingiram as mesmas taxas de remoção observadas aqui. Esses dados indicam que, mesmo sem o uso de processos biológicos avançados, os coagulantes utilizados, especialmente a *M. oleifera*, alcançaram elevada eficiência, mostrando-se alternativas promissoras e ambientalmente sustentáveis no tratamento de efluentes ricos em nutrientes.

3.3.3.3. Análise Microbiológica do Efluente Tratado com *M. oleifera* e PAC

Os tratamentos com *M. oleifera* e PAC demonstraram extrema eficiência na redução de microrganismos patogênicos (média de 99,99%), com ambos apresentando contagens inferiores a 1,0 UFC/mL para coliformes totais, *Escherichia coli* e *Bacillus cereus* (Tabela 3.2). A redução média de 96,67% para bactérias mesófilas no tratamento com *M. oleifera*, em comparação a 99,93% alcançados pelo PAC, reflete o desempenho antimicrobiano de ambas as abordagens, mas ressalta o

potencial sustentável e ecológico da *M. oleifera*. Estudos prévios corroboram esses achados. Sané et al. (2024) reportaram reduções superiores a 99,9% de *E. coli*, coliformes fecais e *Vibrio cholerae* após o tratamento com *M. oleifera*, enquanto Andrade et al. (2021) observaram reduções de 99,7% para *E. coli* e 99,6% para coliformes totais.

TABELA 3.2 - CONTAGEM DE MICRORGANISMOS NO EFLUENTE TRATADOS COM *M. OLEIFERA* E PAC.

Microrganismos (UFC/mL)	Efluente bruto (UFC/mL)	Tratamento com 100% MO (UFC/mL)	Tratamento com 100% PAC (UFC/mL)
Coliformes totais	8×10^4	<1,0	<1,0
<i>Escherichia coli</i>	4×10^5	<1,0	<1,0
<i>Bacillus cereus</i>	6×10^5	<1,0	<1,0
Bactérias mesófilas	3×10^5	1×10^4	2×10^2

FONTE: O autor (2025).

A eficácia da *M. oleifera* na remoção microbiológica é atribuída à ação combinada de proteínas catiônicas, compostos fenólicos, saponinas e isotiocianatos como os principais agentes envolvidos (Fontana et al., 2022). Esses compostos possuem múltiplos mecanismos de ação, incluindo a desestabilização de membranas celulares, inibição da síntese de proteínas e danos ao DNA dos microrganismos (Fontana et al., 2022). Além disso, a *M. oleifera* atua de forma sinérgica, promovendo a coagulação de partículas e a remoção de matéria orgânica, o que contribui para a redução da carga microbiana (Andrade et al., 2021).

A *M. oleifera* demonstrou uma capacidade eficaz na remoção de bactérias mesófilas, além de oferecer benefícios adicionais como menor impacto ambiental, biodegradabilidade e viabilidade econômica. Esses fatores reforçam seu potencial como uma alternativa ecológica e acessível para o tratamento de efluentes, especialmente em regiões com recursos limitados ou onde se busca reduzir o uso de produtos químicos sintéticos.

3.4 CONCLUSÕES

A *M. oleifera* demonstrou desempenho quantitativo expressivo no tratamento do efluente gerado pelo processo de parboilização de arroz, alcançando reduções de até 92,22% na turbidez, 66,06% na absorbância UV_{254nm}, 87,66% na

concentração de sólidos, 91,51% nos teores de fósforo e nitrogênio, e reduções superiores a 80% nos parâmetros DBO e DQO. Esses resultados evidenciam sua viabilidade como uma alternativa natural ao coagulante sintético PAC, especialmente por dispensar etapas complexas como a extração e purificação das proteínas coagulantes. Além disso, a *M. oleifera* apresenta vantagens operacionais e ambientais, como baixo custo, biodegradabilidade e menor geração de resíduos. Por outro lado, a associação entre *M. oleifera* e PAC não resultou em melhorias significativas em comparação ao uso isolado dos coagulantes, indicando que a combinação não é tecnicamente vantajosa para esse tipo de efluente. Este estudo reforça o potencial da *M. oleifera* como uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de efluentes industriais, em especial em contextos onde há restrição de recursos ou necessidade de práticas ambientalmente mais responsáveis.

Perspectivas futuras incluem a investigação da associação da *M. oleifera* com outros coagulantes sintéticos além do PAC, visando identificar combinações mais eficazes e sinérgicas, que possam potencializar a remoção de contaminantes e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos ambientais. Estudos comparativos entre diferentes coagulantes e tipos de efluente podem contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e adaptáveis a diferentes realidades industriais.

A adoção do uso exclusivo da *M. oleifera* como coagulante natural no tratamento de efluentes representa um avanço relevante para a indústria de alimentos, ao aliar elevado desempenho na remoção de poluentes a uma redução no uso de compostos químicos sintéticos. Essa estratégia sustentável contribui para uma gestão ambiental mais responsável, promovendo a proteção dos recursos hídricos, a diminuição de riscos à saúde pública e o fortalecimento de práticas industriais ecologicamente corretas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da elaboração dos três capítulos apresentados nesta tese, foram alcançados avanços relevantes na pesquisa e no desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais, utilizando coagulantes naturais à base de plantas, com ênfase na *M. oleifera*.

No **Capítulo 1**, a revisão abrangente da literatura destacou o papel dos coagulantes naturais no tratamento de efluentes industriais. Este capítulo mostrou que a *M. oleifera* é um dos coagulantes vegetais mais promissores, devido à sua eficácia na remoção de turbidez e contaminantes orgânicos, associada à baixa toxicidade e alta biodegradabilidade. A revisão também abordou os avanços recentes na extração e aplicação desses coagulantes, identificando as principais barreiras para sua implementação em larga escala, como a falta de normatização e incentivos econômicos.

No **Capítulo 2**, onde foram apresentados os resultados dos testes experimentais realizados com a combinação de *M. oleifera* e Policloreto de Alumínio (PAC) no tratamento de águas de baixa turbidez, foi demonstrado que a associação dos coagulantes foi eficiente na remoção de turbidez e cor, com a vantagem de reduzir o residual de alumínio no efluente tratado. A análise estatística comprovou a otimização dos parâmetros operacionais, demonstrando a viabilidade técnica preliminar dessa combinação como uma solução intermediária para sistemas de tratamento que exigem alta eficiência sem comprometer os princípios da sustentabilidade.

No **Capítulo 3**, analisou-se o tratamento de efluentes da parboilização do arroz, caracterizados por altas cargas orgânicas e microbiológicas. A aplicação combinada de *M. oleifera* e PAC mostrou-se eficaz na remoção de matéria orgânica, turbidez e coliformes, atingindo níveis de qualidade adequados para o descarte ou potencial reutilização. O estudo evidenciou que a associação de coagulantes naturais e químicos é uma abordagem promissora para tratar efluentes industriais complexos, desde que os parâmetros de dosagem e pH sejam ajustados de forma otimizada.

REFERÊNCIAS

- ABALIWANO, J. K.; GHEBREMICHAEL, K. A.; AMY, G. L. Aplicação do coagulante Moringa *Oleifera* purificado para tratamento de águas superficiais. **WaterMill Working Paper Series**, 2008. p. 1–19.
- ABIDIN, Z. Z.; MOHD SHAMSUDIN, N. S.; MADEHI, N.; SOBRI, S. Otimização de um método para extrair o agente coagulante ativo de sementes de *Jatropha curcas* para uso na remoção de turbidez. **Ind. Crop. Prod.**, v. 41, p. 319–323, 2013.
- ADEWUYI, A. S.; ADEWUMI, J. R. Otimização do processo de coagulação-floculação para o tratamento de águas residuais utilizando coagulantes inorgânicos e naturais. **J. Eng. Eng. Technol.**, v. 12, p. 260–265, 2018.
- ADINOLFI, M.; CORSARO, M. M.; LANZETTA, R. et al. Composição da fração de polissacarídeo coagulante de sementes de *Strychnos potatorum*. **Carbohydr. Res.**, v. 263, 1994.
- AGARWAL, M.; RAJANI, S.; MISHRA, A.; RAI, J. S. P. Utilização de goma de quiabo para tratamento de efluentes de curtume. **Int.**, v. 52, p. 1049–1057, 2003.
- AGUILAR, M. I.; SAEZ, J.; LLORENS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F. Observação microscópica da redução de partículas em águas residuais de matadouros por coagulação-floculação utilizando sulfato férrico como coagulante e diferentes auxiliares de coagulação. **Water Res.**, v. 37, p. 2233–2241, 2003.
- AHMAD, A.; KURNIAWAN, S. B.; ABDULLAH, S.R.S.; OTHMAN, A.R.; HASAN, H. A. Explorando os métodos de extração para coagulantes à base de plantas e suas abordagens futuras, **Sci. Total Environ.** 2021.
- ALI, G.H.; EL-TAWEEL, G.E.; ALI, M.A. A citotoxicidade e eficiência antimicrobiana de extratos de sementes de Moringa *oleifera*. **Int.**, v. 61, p. 699–708, 2004.
- ALTENOR, S.; GASPARD, S. Biomassa para tratamento de água: biossorvente, coagulantes e floculantes. In: **RSC Green Chemistry**, 2014.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. American Public Health Association, 2017.
- AMRAN, M. H.; ZAIDI, N. S.; MUDA, K.; LOAN, L. W. Eficácia do coagulante natural no processo de coagulação: revisão. **Int. J. Eng. Technol.**, v. 7, n. 3.9, p. 34–37, 2018.
- ANDRADE, P. V.; PALANCA, C. F.; OLIVEIRA, M. A. C.; ITO, C. Y. K.; REIS, A. G. Utilização da semente de Moringa *oleifera* como coagulante natural no tratamento terciário de águas residuais domésticas: avaliação físico-química, citotóxica e de carga bacteriana. **J. Water Process Eng.**, v. 40, p. 101859, 2021.

ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. Estado da arte e sustentabilidade de coagulantes naturais no tratamento de água e esgoto. **J. Clean.**, v. 262, 2020.

ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. Tecnologia de processo integrada e híbrida. In: **Sustainable Water and Wastewater Processing**. Elsevier, 2019. p. 279–328.

ANTOV, M. G.; SCIBAN, M. B.; PRODANOVIC, J. M. Semente de carvalho comum (*Quercus robur*) como fonte de coagulantes naturais para remoção de turbidez da água. **Ind. Crop. Prod.**, v. 117, p. 340–346, 2018.

ASATI, S. R. Tratamento de águas residuais da unidade de moagem de arroz parboilizado por coagulação/floculação. **International Journal of Life Sciences, Biotechnology and Pharma Research**, v. 2, n. 5, 2013.

AWAD, M.; WANG, H.; LI, F. Estudo preliminar sobre o uso combinado de extrato de sementes de Moringa e PAC para tratamento de água. **Res. J. Recent Sci.**, v. 2, p. 52-55, 2013.

BADAWI, A. K.; SALAMA, R. S.; MOSTAFA, M. M. M. Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments. **RSC Advances**, v. 13, n. 28, p. 19335–19355, 2023.

BAGHOTH, S. A.; SHARMA, S. K.; AMY, G. L. Monitoramento da matéria orgânica natural (MON) em uma estação de tratamento de água potável usando matrizes de excitação-emissão de fluorescência. **Water Res.**, v. 45, n. 2, p. 797–809, 2011.

BAGHVAND, A.; ZAND, A. D.; MEHRDADI, N.; KARBASSI, A. Otimizando o processo de coagulação para águas de baixa a alta turbidez usando sais de alumínio e ferro, **Am. J. Environ. Sci.**, 6, 2010.

BAIRD, R.; EATON, A. D.; RICE, E. W. Métodos padrão para o exame de água e águas residuais. **APHA Press**, 23. ed. Washington, DC, 2017.

BALBINOTI, J. R.; DOS SANTOS JUNIOR, R. E.; DE SOUSA, L. B. F.; DE JESUS BASSETTI, F.; BALBINOTI, T. C. V.; JORGE, R. M. M.; DE MATOS JORGE, L. M. Coagulantes à base de plantas para tratamento de águas residuais da indústria alimentícia. **Journal of Water Process Engineering**, v. 52, p. 103525, 2023.

BALBINOTI, J. R.; JORGE, R. M. M.; DOS SANTOS JUNIOR, R. E.; BALBINOTI, T. C. V.; CORAL, L. A. A.; DE JESUS BASSETTI, F. Tratamento de água de baixa turbidez por coagulação combinando Moringa *oleifera* Lam e cloreto de polialumínio (PAC). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, p. 111624, 2024.

BALBINOTI, T. C. V.; DE MATOS JORGE, L. M.; MATOS JORGE, R. M. Modelagem da etapa de hidratação do processo de parboilização do arroz (*Oryza sativa*). **Journal of Food Engineering**, v. 216, p. 81–89, 2017.

BAPTISTA, A. T. A.; SILVA, M. O.; GOMES, R. G. Fracionamento de proteínas de sementes de Moringa *oleifera* Lam e sua aplicação no tratamento de águas superficiais. **Sep. Purif. Technol.**, v. 180, p. 114–124, 2017.

BASTOS, L. R. S.; BASTOS, L. P.; CARNEIRO, P. C. F. et al. Avaliação da qualidade da água do curso superior do principal rio do sul do Brasil (rio Iguaçu) por meio da exposição in situ do siluriforme nativo *Rhamdia quelen* em gaiolas. **Environ. Pollut.**, v. 231, p. 1245–1255, 2017.

BELTRAN-HEREDIA, J.; SANCHEZ-MARTÍN, J. Remoção de sulfato de sódio por coagulação/floculação utilizando extrato de semente de *Moringa oleifera*. **J. Hazard. Mater.**, v. 164, n. 2–3, p. 713–719, 2009.

BHATIA, S.; OTHMAN, Z.; AHMAD, A. L. Pré-tratamento de efluente de moinho de óleo de palma (POME) usando sementes de *Moringa oleifera* como coagulante natural. **J. Hazard. Mater.**, v. 145, p. 120–126, 2007a.

BHATIA, S.; OTHMAN, Z.; AHMAD, A. L. Pré-tratamento de efluentes de moinho de óleo de palma usando sementes de *Moringa oleifera* como coagulante ecologicamente correto: estudos de laboratório e planta piloto. **J. Chem. Technol. Biotechnol.**, v. 81, p. 1852–1858, 2006.

BHATIA, S.; OTHMAN, Z.; AHMAD, A. L. Processo de coagulação-floculação para tratamento de POME usando extrato de sementes de *Moringa oleifera*: estudos de otimização. **Chem. Eng. J.**, v. 133, p. 205–212, 2007b.

BHATTACHARJEE, C.; DUTTA, S.; SAXENA, V. K. Uma revisão sobre a remoção bioabsorptiva de corantes e metais pesados de águas residuais usando casca de melancia como bioabsorvente. **Environmental advances**, v. 2, 2020.

BHUPTAWAT, H.; FOLKARD, G.K.; CHAUDHARI, S. Tratamento físico-químico inovador de águas residuais incorporando coagulante de sementes de *Moringa oleifera*. **J. Hazard.**, v. 142, p. 477–482, 2007.

BHUTADA, P. R.; JADHAV, A. J.; PINJARI, D. V. Extração assistida por solvente de óleo de sementes de *Moringa oleifera* Lam. **Ind. Crop. Prod.**, v. 82, p. 74–80, 2016.

BINDES, M. M.; REIS, M. H. M.; CARDOSO, V. L.; BOFFITO, D. C. Extração assistida por ultrassom de compostos bioativos de folhas de chá verde e clarificação com coagulantes naturais (quitosana e sementes de *Moringa oleifera*). **Ultrason. Sonochem.**, v. 51, p. 111–119, 2019.

BODLUND, I.; PAVANKUMAR, A. R.; CHELLIAH, R. et al. Proteínas coagulantes identificadas na mostarda: um potencial agente de tratamento de água. **Int. J. Environ. Sci. Technol.**, v. 11, p. 873–880, 2014.

BOLTO, B.; GREGORY, J. Polieletrólitos orgânicos no tratamento de água. **Water Research**, v. 41, p. 230, 2007.

CAMACHO, F. P.; SOUSA, V. S.; BERGAMASCO, R.; TEIXEIRA, M. R. O uso do coagulante *Moringa oleifera* como coagulante natural no tratamento de água. **Chem. Eng. J.**, v. 313, p. 226–237, 2017.

CARVALHO, M. S.; ALVES, B. R. R.; SILVA, M. F.; BERGAMASCO, R.; CORAL, L. A.; BASSETTI, F. J. CaCl_2 aplicado na extração de sementes de *Moringa oleifera* para remoção de *Microcystis aeruginosa*. **Chem. Eng. J.**, v. 304, p. 469–475, 2016.

CHAIBAKHSH, N.; AHMADI, N.; ZANJANCHI, M. A. Uso de *Plantago major* L. como coagulante natural para descoloração otimizada de águas residuais contendo corantes. **Ind. Crop. Prod.**, v. 61, p. 169–175, 2014.

CHOUDHARY, M.; NEOGI, S. Proteína coagulante natural de *Moringa oleifera*: isolamento, caracterização e uso potencial para tratamento de água. **Mater. Res. Express**, v. 4, 2017.

CHOY, S. Y.; PRASAD, K. M. N.; WU, T. Y. Utilização de coagulantes naturais à base de plantas como alternativas futuras para clarificação sustentável de água. **J. Environ. Sci. (China)**, v. 26, p. 2178–2189, 2014.

CHOY, S. Y.; PRASAD, K. M. N.; WU, T. Y.; RAMANAN, R. N. Revisão sobre vegetais e leguminosas comuns como coagulantes naturais promissores à base de plantas na clarificação de água. **Int.**, v. 12, p. 367–390, 2015.

COBLE, P. G. Caracterização da matéria orgânica marinha e terrestre em água do mar utilizando espectroscopia de matriz de excitação-emissão. **Mar. Chem.**, v. 51, n. 4, p. 325–346, 1996.

DA COSTA, P. R. F.; DA SILVA, D. R.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; GARCIA-SEGURA, S. Tratamento de efluentes de postos de combustível por tecnologia eletroquímica. **J. Electroanal.**, v. 763, p. 97–103, 2016.

DARYABEIGI, A.; BAGHVAND, A.; ZAND, A. D.; MEHRDADI, N.; KARBASSI, A. Otimização do processo de coagulação para águas de baixa a alta turbidez utilizando sais de alumínio e ferro, **Am. J. Environ. Sci.** 5, 2010, 442–448.

DAVEREY, A.; TIWARI, N.; DUTTA, K. Utilização de extratos de cascas de *Musa paradisica* (banana) e sementes de *Dolichos lablab* (feijão indiano) como coagulantes naturais de baixo custo para remoção de turbidez da água. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v. 26, p. 34177–34183, 2019.

DAVID, C.; NARLAWAR, R.; ARIVAZHAGAN, M. Avaliação de desempenho do extrato de semente de *Moringa oleifera* (MOSE) em conjunto com coagulantes químicos para tratamento de lavagem gasta de destilaria. **Indian chemical engineering**, v. 58, p. 189–200, 2016.

DAYARATHNE, H. N. P.; ANGOVE, M. J.; ARYAL, R.; ABUEL-NAGA, H.; MAINALI, B. Remoção de matéria orgânica natural da água de origem: revisão sobre coagulantes, coagulação dupla, coagulantes alternativos e mecanismos. **J. Water Process Eng.**, v. 40, 2021.

DE PAULA, H.M.; DE OLIVEIRA ILHA, M.S.; ANDRADE, L.S. Processo de tratamento de efluentes de usina de concreto por coagulação combinando sulfato de alumínio e pó de *Moringa oleifera*. **J. Clean. Prod.**, v. 76, p. 125–130, 2014.

DEZFOOLI, S. M.; UVERSKY, V. N.; SALEEM, M. et al. Método simplificado para a purificação de uma proteína coagulante de sementes de *Moringa oleifera* desengorduradas. **Process Biochem.**, v. 51, p. 1085–1091, 2016.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos, Brasil: RiMa, 2005.

DIAZ, A.; RINCON, N.; ESCORIHUELA, A. Uma avaliação preliminar da remoção de turbidez por coagulantes naturais indígenas da Venezuela. In: **www.elsevier.com/locate/procbio**, 1999.

DONG, C.; CHEN, W.; LIU, C. Flocculação de células de algas por flocculação anfotérico à base de quitosana. **Bioresource technology**, v. 170, p. 239–247, 2014.

DOS SANTOS, J. D.; VEIT, M. T.; JUCHEN, P. T. Uso de diferentes coagulantes para tratamento de águas residuais do processamento de mandioca. **J. Environ. Eng.**, v. 6, p. 1821–1827, 2018.

DUAN, J.; GREGORY, J. Coagulação por hidrólise de sais metálicos. **Adv. Colloid Interf. Sci.**, v. 100–102, p. 475–502, 2003.

ELEMILE, O. O.; EZE, N. E.; OGEDENGBE, K. Eficácia da *Moringa oleifera* e associação com alumínio como coagulante no tratamento de águas residuais de laticínios.. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1036, p. 012007, 2021.

FARIA, O. L. V.; KOETZ, P. R.; SANTOS, M. S.; NUNES, W. A. Remoção de fósforo de efluentes da parboilização de arroz por absorção biológica estimulada em reator em batelada sequencial (RBS). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 2, p. 200-206, 2006.

FOLKARD, G.; SUTHERLAND, J.; SHAW, R. Clarificação de água usando coagulante de semente de *Moringa oleifera*. **Água e Saúde Ambiental em Londres e Loughborough (WELL)**, 1999.

FONTANA, R.; MACCHI, G.; CAPRONI, A.; SICURELLA, M.; BURATTO, M.; SALVATORI, F.; PAPPADA, M.; MANFREDINI, S.; BALDISSEROTTO, A.; MARCONI, P. Control of *Erwinia amylovora* growth by *Moringa oleifera* leaf extracts: In vitro and in planta effects. **Plants**, v. 11, n. 7, p. 957, 2022.

FRANCISCO, J. P.; SILVA, J. B. G.; ROQUE, O. C. C. Avaliação do efeito do extrato de sementes de *Moringa oleifera* Lam sobre a eficiência de filtros orgânicos no tratamento de águas residuais da criação de gado leiteiro. **Eng. Agríc.**, v. 34, p. 143–152, 2014.

FRANCO, C. S.; BATISTA, M. D. A.; OLIVEIRA, L. F. C.; KOHN, G. P.; FIA, R. Coagulação com semente de *Moringa oleifera* preparada por diferentes métodos em águas com turbidez de 20 a 100 UNT. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 22, n. 4, p. 781–788, 2017.

FREITAS, J. H. E. S.; DE SANTANA, K. V.; DO NASCIMENTO, A. C. C. Avaliação do uso de sulfato de alumínio e lectina de semente de *Moringa oleifera* solúvel em água para reduzir a turbidez e a toxicidade de água de riacho poluída. **Chemosphere**, v. 163, p. 133–141, 2016.

FREITAS, K. F. S.; ALMEIDA, C. A.; MANHOLER, D. D. Revisão da utilização de coagulantes de origem vegetal como alternativas ao tratamento de águas residuais têxteis. **Springer**, 2018, p. 27–79.

FREITAS, T. K. F. S.; OLIVEIRA, V. M.; DE SOUZA, M. T. F. Otimização do processo de coagulação-floculação para tratamento de efluentes têxteis industriais usando mucilagem de quiabo (*A. esculentus*) como coagulante natural. **Ind. Crop. Prod.**, v. 76, p. 538–544, 2015.

GAIKWAD, V. T.; MUNAVALLI, G. R. Remoção de turbidez por coagulação convencional utilizando coagulantes naturais. **Appl. Water Sci.**, v. 9, 2019.

GANDIWA, B. I.; MOYO, L. B.; NCUBE, S.; MAMVURA, T. A.; MGUNI, L. L.; HLABANGANA, N. Otimização do uso de uma mistura de coagulantes naturais e sintéticos de origem vegetal para tratamento de água: (mistura de *Moringa oleifera*-Cactus *Opuntia*-alúmen). **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 34, p. 158–164, 2020.

GAO, B. Y.; YUE, Q. Y.; WANG, Y. Desempenho de coagulação de cloreto de silicato de polialumínio (PASiC) para tratamento de água e esgoto. **Separation and Purification Technology**, v. 56, p. 225–230, 2007.

GARCIA, J. C.; OLIVEIRA, J.L.; SILVA, A.E.C.; OLIVEIRA, C.C.; NOZAKI, J.; DE SOUZA, N. E. Estudo comparativo da degradação de efluentes têxteis reais por reações fotocatalíticas envolvendo sistemas UV/TiO₂/H₂O₂ e UV/Fe²⁺/H₂O₂. **J. Hazard.**, v. 147, p. 105–110, 2006.

GARCÍA-FAYOS, B.; ARNAL, J. M.; MONFORTE-MONLEON, L.; SANCHO, M. Alternativas ao uso de coadjuvantes coagulantes orgânicos sintéticos no tratamento de água potável: melhorias na aplicação do extrato bruto da semente de *Moringa oleifera*. **Desalination and Water Treatment**, v. 55, n. 13, p. 3635–3645, 2015.

GARDE, W. K.; BUCHBERGER, S. G.; WENDELL, D.; KUPFERLE, M. J. Aplicação de extrato de semente de *Moringa oleifera* para tratamento de águas residuais de fermentação de café. **J. Hazard. Mater.**, v. 329, p. 102–109, 2017.

GEORGE, A.; ROSHAN, J.; EMMANUEL, J. *Moringa oleifera* - um coagulante à base de plantas para tratamento de águas residuais. **Int. J. Sci. Res.**, v. 5, 2016.

GERBER, M. D.; ARSAND, D. R.; LÚCIA, T.; CORREA, E. K. Phytotoxicity Avaliação de águas residuais da parboilização do arroz. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 101, p. 678–683, 2018.

GHEBREMICHAEL, K. A.; GUNARATNA, K. R.; HENRIKSSON, H. Ensaio de purificação e atividade da proteína coagulante da semente de *Moringa oleifera*. **Water Res.**, v. 39, 2005.

GHEBREMICHAEL, K.; ABALIWANO, J.; AMY, G. Coagulantes naturais orgânicos e inorgânicos sintéticos combinados para tratamento de águas superficiais. **J. Water Supply Res. Technol. AQUA**, v. 58, p. 267–276, 2009.

GIDDE, R. M.; BHALERAO, A. R.; MALUSARE, C. N. Estudo comparativo de diferentes formas de extratos de *Moringa oleifera* para remoção de turbidez. **Int. J. Eng. Res. Dev.**, v. 2, 2012.

HAMEED, Y. T.; IDRIS, A.; HUSSAIN, S. A.; ABDULLAH, N. Um agente à base de tanino para coagulação e floculação de águas residuais municipais: composição química, avaliação de desempenho em comparação com cloreto de polialumínio e aplicação em uma planta piloto. **J. Environ. Manag.**, v. 184, p. 494–503, 2016.

HOSSEINY, S.; HUISINGH, A. Avaliação da capacidade de biogás produzida por águas residuais de matadouros no Irã. In: **18ª Conferência da rede de ecologização da indústria**, Suécia, 2012.

HUANG, M.; LIU, Z.; LI, A.; YANG, H. Funcionalidade dupla de um floculante de amido de enxerto: floculação e desempenho antibacteriano. **J. Environ. Manag.**, v. 196, p. 63–71, 2017.

JAGABA, A. H.; HAYDER, G. Uso sustentável de coagulantes naturais e químicos para remoção de contaminantes de efluentes de moinhos de óleo de palma: uma análise comparativa. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 11, n. 4, p. 951–960, 2020.

JAHN, S. A. A. Uso de sementes de *Moringa* como coagulantes em países em desenvolvimento. **Journal of the American Water Works Association**, v. 80, n. 6, p. 43–50, 1988.

JERRI, H. A.; ADOLFSSEN, K. J.; MCCULLOUGH, L. R. Areia antimicrobiana via adsorção de proteína catiônica de *Moringa oleifera*. **Langmuir**, v. 28, p. 2262–2268, 2012.

JIANG, J.-Q. O papel da coagulação no tratamento de água. **Curr. Opin. Chem. Eng.**, v. 8, p. 36–44, 2015.

JONES, A. N.; BRIDGEMAN, J. Uma avaliação baseada em fluorescência para análise da matéria orgânica em água tratada usando sementes de hibisco brutas/purificadas como coagulante no tratamento de água potável. **Sci. Total Environ.**, v. 646, p. 1–10, 2019.

JUNG, Y.; JUNG, Y.; KWON, M. Avaliação do extrato de semente de *Moringa oleifera* pelo tempo de extração: efeito na eficiência de coagulação e característica do extrato. **J. Water Health**, v. 16, p. 904–913, 2018.

JUNHO, A. L.; DOS SANTOS, I. F. S.; SILVA, A. M. L. Tratamento de águas residuais da indústria de laticínios empregando dois métodos de coagulação com *Moringa oleifera*. **Res. Soc. Dev.**, v. 10, 2021.

JUNIOR, A. T.; HASAN, S. D. M.; SEBASTIEN, N. Y. Otimização do tratamento de coagulação/floculação de águas residuais de cervejaria empregando floculante orgânico à base de tanino vegetal. **Water Air Soil Pollut.**, v. 230, 2019.

JUSTINA, M. D.; BAGNOLIN MUNIZ, B. R.; MATTGE BRÖRING, M. Uso de tanino vegetal e cloreto de polialumínio como coagulantes para tratamento de águas residuais de laticínios: um estudo comparativo. **J. Water Process Eng.**, v. 25, p. 173–181, 2018.

KALIBBALA, H.M.; WAHLBERG, O.; HAWUMBA, T.J. O impacto da *Moringa oleifera* como um auxiliar coagulante na remoção de precursores de trihalometano (THM) e ferro da água potável. **Water Sci. Technol. Water Supply**, v. 9, p. 707–714, 2009.

KAMALI, M.; SUHAS, D. P.; COSTA, M. E. et al. Considerações de sustentabilidade em tecnologias baseadas em membranas para tratamento de efluentes industriais. **Chem. Eng. J.**, v. 368, p. 474–494, 2019.

KANSAL, S. K.; KUMARI, A. Potencial de *Moringa oleifera* para o tratamento de água e águas residuais. **Chem. Rev.**, v. 114, p. 4993–5010, 2014.

KATAYON, S.; NOOR, M. J. M. M.; ASMA, M. Efeitos das condições de armazenamento de sementes de *Moringa oleifera* em seu desempenho na coagulação. **Bioresour. Technol.**, v. 97, 2006.

KAZI, T.; VIRUPAKSHI, A. Tratamento de águas residuais de curtume usando coagulantes naturais. **Int. Journal of Innovative Reserach in Science, Engineering and Technology**, v. 2, 2007.

KHAYET, M.; ZAHRIM, A. Y.; HILAL, N. Modelagem e otimização da coagulação de corante de couro industrial altamente concentrado por metodologia de superfície de resposta. **Desalination**, v. 276, p. 1–8, 2011.

KIM, S.; MOON, B.; LEE, H. Efeitos do pH e da dosagem na remoção de poluentes e na estrutura dos flocos durante a coagulação. **Microchem. J.**, v. 68, p. 197–203, 2001.

KOUL, B.; BHAT, N.; ABUBAKAR, M.; MISHRA, M.; ARUKHA, A. P.; YADAV, D. Aplicação de coagulantes naturais no tratamento de água: uma alternativa sustentável aos produtos químicos. **Water**, v. 14, n. 22, p. 3751, 2022.

KUMAR, V.; OTHMAN, N.; ASHARUDDIN, S. Aplicações de coagulantes naturais para tratamento de águas residuais: revisão. **Matec Web Conf.**, v. 103, 2017.

KURNIAWAN, S. B.; ABDULLAH, S. R. S.; IMRON, M. F.; SAID, N. S. M.; IZZATI ISMAIL, N.; HASAN, H. A.; OTHMAN, A. R.; PURWANTI, I. F. Desafios e oportunidades da aplicação de biocoagulantes/biofloculantes para tratamento de

água potável e águas residuais e seu potencial para recuperação de lodo. **Int. Saúde Pública**, v. 17, p. 1–33, 2020.

KWAAMBWA, H. M.; MAIKOKERA, R. Um estudo espectroscópico de fluorescência de uma proteína coagulante extraída de sementes de *Moringa oleifera*. **Colloids Surf. B: Biointerfaces**, v. 60, p. 213–220, 2007.

KWAAMBWA, H.M.; HELLSING, M.; RENNIE, A.R. Adsorção de uma proteína de tratamento de água de sementes de *Moringa oleifera* a uma superfície de óxido de silício estudada por reflexão de nêutrons. **Langmuir**, v. 26, n. 6, p. 3902–3910, 2010.

LEE, C. S.; ROBINSON, J.; CHONG, M. F. Uma revisão sobre a aplicação de floculantes no tratamento de águas residuais. **Process safety and environmental protection**, v. 92, p. 489–508, 2014.

LEE, K. E.; MORAD, N.; TENG, T. T.; POH, B. T. Desenvolvimento, caracterização e aplicação de materiais híbridos na coagulação/floculação de águas residuais: revisão. **Chem. Eng. J.**, v. 203, p. 370–386, 2012.

LI, K.; HAN, M.; XU, Y.; ZHANG, J.; WEI, T.; WEN, G.; HUANG, T. Desempenho da filtração por membrana acionada pela gravidade para tratamento de água de baixa temperatura e baixa turbidez: efeito do pré-tratamento de coagulação. **J. Water Process Eng.**, v. 53, 2023.

LIN, Q.; PENG, H.; ZHONG, S.; XIANG, J. Síntese, caracterização e desempenho de desidratação de lodo secundário de um novo floculante combinado de silício-alumínio-ferro-amido. **J. Hazard. Mater.**, v. 285, p. 199–206, 2015.

LO MONACO, P. A. V.; DE MATOS, A. T.; RIBEIRO, I. C. A. Uso do extrato de sementes de *Moringa oleifera* como agente coagulante no tratamento de abastecimento de água e águas residuais. **Ambi-Agua**, v. 5, p. 222–231, 2010.

LOPES, V. S.; SILVA, L. M.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. Estudo da coagulação/floculação de águas com baixa turbidez na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Eng. Sanitária e Ambient.**, v. 25, p. 567–572, 2020.

MADRONA, G.S.; SERPELLONI, G.B.; VIEIRA, A.M.S. Estudo do efeito da solução salina na extração do componente ativo da semente de *Moringa oleifera* para tratamento de água. **Water Air Soil Pollut.**, v. 211, 2010.

MARKETS and MARKETS. Mercado de floculantes e coagulantes por tipo (floculante aniônico, catiônico, coagulante orgânico e coagulante inorgânico), indústria de uso final (tratamento de água municipal, celulose e papel, têxtil, petróleo e gás, mineração) e região - previsão global para 2022. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/flocculant-and-coagulant-market-243584994.html>. Acesso em: 18 out. 2021.

MAROBHE, N. J.; DALHAMMAR, G.; GUNARATNA, K. R. Métodos simples e rápidos para purificação e caracterização de coagulantes ativos das sementes de

Vigna unguiculata e *Parkinsonia aculeata*. **Environ. Technol.**, v. 28, p. 671–681, 2007.

MATEUS, G. A. P.; FORMENTINI-SCHMITT, D. M.; NISHI, L. Coagulação/floculação com *Moringa oleifera* e filtração por membrana para tratamento de águas residuais de laticínios. **Water Air Soil Pollut.**, v. 228, 2017.

MATOS, A. T.; CABANELLAS, C. F. G.; CECON, P. R. Efeitos da concentração de coagulantes e solução de pH na turbidez da água de recirculação usada no processamento de cereja de café. **Eng. Agric.**, v. 27, p. 544–551, 2007.

MAXIMOVA, N.; DAHL, O. Implicações ambientais dos fenômenos de agregação: compreensão atual. **Curr. Opin. Colloid Interface Sci.**, v. 11, p. 246–266, 2006.

MEGERSA, M.; GACH, W.; BEYENE, A. Efeito de soluções salinas no desempenho de coagulação de *Moringa stenopetala* e *Maerua subcordata* para tratamento de água turva. **Sep. Purif. Technol.**, v. 221, p. 319–324, 2019.

MILLER, S. M.; FUGATE, E. J.; CRAVER, V. O. Compreensão da eficácia e do mecanismo de *Opuntia* spp. como coagulante natural para potencial aplicação no tratamento de água. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, p. 4274–4279, 2008.

MOHD-ESA, N.; HERN, F. S.; ISMAIL, A.; YEE, C. L. Atividade antioxidante em diferentes partes de extratos de roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) e potencial exploração das sementes. **Food Chem.**, v. 122, p. 1055–1060, 2010.

MOHD-SALLEH, S. N. A.; MOHD-ZIN, N. S.; OTHMAN, N. Revisão do tratamento de águas residuais utilizando material natural e seu potencial como auxiliar e coagulante composto. **Sains Malaysiana**, v. 48, p. 155–164, 2019.

MUKHERJEE, C.; CHOWDHURY, R.; SUTRADHAR, T.; BEGAM, M. Efluente de arroz parboilizado: águas residuais para microalgas e cianobactérias com crescimento associado à remediação abrangente e biofertilização com fósforo. **Algal Res.**, v. 19, p. 225–236, 2016.

NATH, A.; MISHRA, A.; PANDE, P. P. Uma revisão de coagulantes poliméricos naturais no tratamento de águas residuais. **Mater. Today Proc.**, v. 46, p. 6113–6117, 2021.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Qualidade da água tratada por coagulação com sementes de *Moringa oleifera*. **Water Res.**, v. 32, n. 3, p. 781–791, 1998.

NIMESHA, S.; HEWAWASAM, C.; JAYASANKA, D. Eficácia de coagulantes naturais no tratamento de água e esgoto. **Glob. J. Environ. Sci. Manag.**, v. 8, 2022.

NONFODJI, O. M.; FATOMBI, J. K.; AHOYO, T. A.; OSSENI, S. A.; AMINOU, T. Desempenho das proteínas de sementes de *Moringa oleifera* e de seu uso conjugado com cloreto de polialumínio na remoção de matéria orgânica e bactérias

resistentes a antibióticos de águas residuais hospitalares. **J. Water Process Eng.**, v. 33, 2020.

NOOR, M. H. M.; LEE, W. J.; MOHD AZLI, M. F. Z. Micro-ondas vs. síntese ultrassônica de coagulante magnético de Moringa *oleifera* para a redução da demanda química de oxigênio em águas residuais de óleo de palma. **Environ. Technol. Innov.**, v. 24, 2021.

NORDMARK, B. A.; PRZYBYCIEN, T. M.; TILTON, R. D. Estudo comparativo de desempenho de coagulação de frações de proteína catiônica de Moringa *oleifera* com dureza de água variável. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, p. 4690–4698, 2016.

NZEYIMANA, B. S.; MARY, A. D. C. Tratamento sustentável de águas residuais com base no uso do coagulante vegetal natural Moringa *oleifera*. **Discover Water**, v. 4, p. 15, 2024.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Mecanismo de coagulação do componente ativo extraído de solução salina em sementes de Moringa *oleifera*. **Water Res.**, v. 35, n. 3, p. 830–834, 2001.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Melhoria do método de extração de coagulação de componentes ativos da semente de Moringa *oleifera*. **Water Res.**, v. 33, p. 3373–3378, 1999.

OLADOJA, N. A. Avanços na busca por substitutos para polieletrólitos orgânicos sintéticos como auxiliares coagulantes em operações de tratamento de água e águas residuais. **Sustain. Química. Farmácia.**, v. 3, p. 47–58, 2016.

OLADOJA, N. A. Avanços no uso de coagulantes poliméricos naturais em operações de tratamento de água e esgoto. **J. Water Process Eng.**, v. 6, p. 174–192, 2015.

OLADOJA, N. A. Perspectivas sobre o uso de equações de isotermas de equilíbrio para elucidar mecanismos de coagulação-floculação em coagulantes de origem vegetal. **Ind. Crop. Prod.**, v. 70, p. 211–212, 2015.

OLIVEIRA, L. L. C.; FERREIRA, G. G.; CORRÊA, L. F. et al. Análise da taxa de remoção de turbidez em águas naturais utilizando-se extrato de sementes de Moringa *oleifera* Lam. **Rev. Bras. Agropecuária Sustentável**, v. 1, p. 204–210, 2011.

OLVERA, J. D. R.; LOPEZ-LOPEZ, A. Produção de biogás a partir do tratamento anaeróbico de águas residuais agroindustriais. In: KUMAR, S. (Ed.). **Biogás**. InTech, 2012. p. 91–112.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de desenvolvimento sustentável. 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 30 jan. 2024.

OTHMANI, B.; RASTEIRO, M. G.; KHADHRAOUI, M. Rumo à tecnologia verde: uma revisão sobre alguns coagulantes/floculantes eficientes baseados em plantas para

remediação de água doce e águas residuais. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 22, p. 1025–1040, 2020.

PANDEY, P.; KHAN, F. Moringa oleifera como alternativa aos coagulantes químicos na purificação da água. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 58, 2022.

PATALE, V.; PANDYA, J. Extrato de mucilagem de *Coccinia indica* como coagulante-floculante para tratamento de água turva. **Asian J. Plant Sci. Res.**, v. 2, p. 442–445, 2012.

PAVANELLI, G.; DI BERNARDO, L. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PAVON-SILVA, T.; PACHECO-SALAZAR, V.; SÁNCHEZ-MEZA, J. C. Tratamento combinado físico-químico e biológico aplicado a águas residuais da indústria alimentícia para reutilização. **J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.**, v. 44, p. 108–115, 2009.

POUMAYE, N.; MABINGUI, J.; LUTGEN, P.; BIGAN, M. Clarificação de águas superficiais utilizando Moringa *oleifera*: caso do rio M'Poko até Bangui, República Centro-Africana. **Chem. Eng. Res. Des.**, v. 90, p. 2346–2352, 2012.

PRABHAKARAN, G.; MANIKANDAN, M.; BOOPATHI, M. Tratamento de efluentes têxteis usando coagulantes naturais. **Mater Today Proc.** Elsevier Ltd, 2020, p. 3000–3004.

PRASAD, R. K. Remoção de cor de efluente de lavagem de destilaria por coagulação usando sementes de Moringa *oleifera*: emprego de metodologia de superfície de resposta. **J. Hazard. Mater.**, v. 165, p. 804–811, 2009.

PRASAD, S. V. M.; RAO, B. S. Influência de coagulantes à base de plantas no tratamento de águas residuais. **Ijltemas**, v. 5, 2016.

PRITCHARD, M.; CRAVEN, T.; MKANDAWIRE, T. Comparação entre Moringa *oleifera* e coagulantes químicos na purificação de água potável - uma solução sustentável alternativa para países em desenvolvimento. **Phys. Chem. Earth**, v. 35, p. 798–805, 2010.

PRIYA, T.; TARAFDAR, A.; GUPTA, B.; MISHRA, B. K. Efeito de biofloculantes na atividade de coagulação do alumínio para remoção de precursores de trihalometanos de águas com baixa turbidez. **J. Environ. Sci.**, v. 70, p. 1–10, 2018.

QUEIROZ, M. I.; KOETZ, P. R. Caracterização do efluente da parboilização do arroz. **Rev. Bras. de Agrociência**, v. 3, n. 3, p. 139–143, 1997.

QURESHI, K.; BHATTI, I.; SHAIKH, M. S. Desenvolvimento de biocoagulante de caroço de manga para purificação de água turva. **Sindh Univ. Res. J.**, v. 43, p. 105–110, 2011.

RAJ, K. R.; KARDAM, A.; ARORA, J. K. Comportamento de adsorção de corantes de solução aquosa usando resíduos agrícolas: abordagem de modelagem. **Clean Techn. Environ. Política**, v. 15, p. 73–80, 2013.

RAJENDRAN, R.; ABIRAMI, M.; PRABHAVATHI, P. Tratamento biológico de água potável por nanocompósitos à base de quitosana. **Afr. J. Biotechnol.**, v. 14, n. 11, p. 930–936, 2015.

RASOOL, M. A.; TAVAKOLI, B.; CHAIBAKHSH, N. et al. Uso de um coagulante à base de plantas no tratamento combinado de coagulação-ozonização de lixiviado de área de despejo de resíduos. **Ecol. Eng.**, v. 90, p. 431–437, 2016.

REAL-OLVERA, J. D.; RUSTRIAN-PORTILLA, E.; HOUBRON, E.; LANDA-HUERTA, F. J. Adsorção de poluentes orgânicos de águas residuais de matadouros usando pó de sementes de *Moringa oleifera* como coagulante natural. **Desalination**, v. 57, n. 21, p. 9971–9981, 2015.

REBAH, F. B.; SIDDEEG, S. M. Cacto, um material ecológico para tratamento de águas residuais: uma revisão. **J. Mater. Environ. Sci.**, v. 8, p. 1770–1782, 2017.

RIBEIRO, J. V. M.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. Semente de *Moringa oleifera* como coagulante natural para tratar água de baixa turbidez por filtração em linha. **Rev. Ambient. e Agua**, v. 14, n. 6, e-2442, 2019.

RIFI, S. K.; SOUABI, S.; FELS, L. E. Uso do coagulante *Moringa oleifera* para redução da poluição em águas residuais de lavouras de azeite de oliva. **Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.**, v. 20, 2023.

ROCHA, V. V. F.; DOS SANTOS, I. F. S.; SILVA, A. M. L. et al. Clarificação de águas de alta turbidez: uma comparação entre *Moringa oleifera* e coagulantes naturais com sulfato de alumínio. **Environ. Dev. Sustain.**, v. 22, p. 4551–4562, 2020.

SABOIA, A. G. C.; ALMEIDA, A. S. O.; SANTOS, H. A. D. S. Avaliação do uso de *moringa oleifera* como auxiliar de coagulação para o tratamento de águas de reservatórios eutrofizados. **Conex. Ciênc. Tecnol.**, v. 14, n. 1, p. 22, 2020.

SALEEM, M.; SAMI, A. J.; BACHMANN, R. T. Caracterização e triagem da atividade coagulante de proteínas de sementes de *Moringa oleifera* solúveis em água. **Mater. Today.: Proc.**, v. 31, n. 1, p. 207–210, 2020.

SANCHEZ-MARTÍN, J.; GHEBREMICHAEL, K.; BELTRÁN-HEREDIA, J. Comparação de coagulantes purificados de etapa única e de duas etapas da semente de *Moringa oleifera* para remoção de turbidez. **Bioresour. Technol.**, v. 101, p. 6259–6261, 2010.

SANÉ, N.; SIVALINGAM, P.; KOŽELUH, M. et al. Efeito das sementes de *Moringa oleifera* na remoção de patógenos e resíduos farmacêuticos em uma estação de tratamento de águas residuais domésticas. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v. 31, p. 65123–65136, 2024.

SAPANA, M. M.; SONAL, C. G. Uso da semente de *Moringa oleifera* como absorvente natural e agente antimicrobiano para tratamento de águas subterrâneas. **Lambert Academic Publications**, 2012.

SAUNITI, R. M.; FERNANDES, L. A.; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo do assoreamento do reservatório da barragem do Rio Passaúna – Curitiba – PR. **Bol. Parana. de Geociências**, v. 54, 2004.

SAYANTHAN, S.; THUSYANTHY, Y. Parboilização de arroz e modelos de tratamento de efluentes: revisão. **Int. J. Res. Stud. Agric. Sci. (IJRSAS)**, v. 4, p. 17–23, 2018.

SCIBAN, M.; KLASNJA, M.; SKRBIC, B. Remoção de turbidez da água por coagulantes naturais. **Progresso em Ciência e Tecnologia Ambiental**, v. II, 2009.

SEGHOSIME, A.; AWUDZA, J. A. M.; BUAMAH, R.; KWARTENG, S. O. Estudos comparativos sobre composição próxima e triagem fitoquímica de sementes de manga, limão-taiti, maçã-estrela africana e pera africana como possíveis auxiliares coagulantes para tratamento de água. **Am.**, v. 13, p. 325–333, 2017.

SHAK, K. P. Y.; WU, T. Y. Tratamento de coagulação-floculação de águas residuais agroindustriais de alta resistência usando goma de semente natural de *Cassia obtusifolia*: eficiências de tratamento e caracterização de flocos. **Chem. Eng. J.**, v. 256, p. 293–305, 2014.

SHAK, K. P. Y.; WU, T. Y. Uso otimizado de alumínio e goma de semente de *Cassia obtusifolia* não modificada como um auxiliar coagulante no tratamento de efluentes de moinho de óleo de palma sob pH natural de águas residuais. **Ind. Prod.**, v. 76, p. 1169–1178, 2015.

SHAMSNEJATI, S.; CHAIBAKHSH, N.; PENDASHTEH, A. R.; HAYERIPOUR, S. Semente mucilaginosa de *Ocimum basilicum* como coagulante natural para tratamento de águas residuais têxteis. **Ind. Crop. Prod.**, v. 69, p. 40–47, 2015.

SHARMA, B. R.; DHULDHOYA, N. C.; MERCHANT, U. C. Flocculantes – uma abordagem ecologicamente correta. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 14, n. 2, p. 195–202, 2006.

SHILPA, B. S.; GIRISH, P. Avaliação de cascas de cacto e feijão-jacinto como coagulantes naturais. **International Engineering Journal**, v. 3, 2012.

SKAF, D. W.; PUNZI, V. L.; ROLLE, J. T.; CULLEN, E. Impacto das condições de extração de *Moringa oleifera* no potencial zeta e na eficácia da coagulação. **J. Environ. Chem. Eng.**, v. 9, n. 1, 2021.

SPENCER, R. G. M.; BOLTON, L.; BAKER, A. Efeitos de congelamento e pH nas propriedades de fluorescência e absorbância da matéria orgânica dissolvida em água doce em várias áreas do Reino Unido. **Water Res.**, v. 41, n. 13, p. 2941–2950, 2007.

SUHARTINI, S.; HIDAYAT, N.; ROSALIANA, E. Influência de sementes de *Moringa oleifera* em pó nas características de águas residuais de amido de tapioca. **Ijrowa**, p. 1–11, 2013.

SUJANA, O.; SYAMALA DEVI, K.; SREEVALLI, M. Aplicação de coagulantes naturais no tratamento de águas residuais. **J. Emerg. Technol. Innov. Res.**, v. 6, 2019.

SUN, Y.; SHAH, K. J.; SUN, W.; ZHENG, H. Avaliação do desempenho de floculantes à base de quitosana com alta capacidade de remoção de metais pesados. **Sep. Purif. Technol.**, v. 215, p. 208–216, 2019.

SUTHERLAND, J. P.; FOLKARD, G. K.; MTAWALI, M. A.; GRANT, W. D. *Moringa oleifera* como coagulante natural. **20th WEDC Conference**. Sri Lanka, 1994.

TEH, C. Y.; ZAHRIM, A. Y.; HILAL, N. Avanço recente da coagulação-floculação e sua aplicação no tratamento de águas residuais. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 55, p. 4363–4389, 2016.

TEH, C. Y.; WU, T. Y.; JUAN, J. C. Otimização do tratamento de águas residuais agroindustriais usando amido de arroz não modificado como coagulante natural. **Industrial crops and products**, v. 56, p. 17–26, 2014b.

TEH, C. Y.; WU, T. Y.; JUAN, J. C. Uso potencial de amido de arroz no processo de coagulação-floculação de águas residuais agroindustriais: desempenho do tratamento e caracterização de flocos. **Ecological engineering**, v. 71, p. 509–519, 2014a.

THAKUR, S. S.; CHOUBEY, S. Avaliação da eficiência de coagulação de *Moringa oleifera* e quiabo para tratamento de água turva. **Arch. Appl. Sci. Res.**, v. 6, p. 24–30, 2014.

TRIQUES, C. C.; CARVALHO, J. K.; RODRIGUES, M. L. F.; DALL’OGLIO, I. C.; SILVA-LUCCA, R. A.; FAGUNDES-KLEN, M. R. Avaliação da influência da funcionalização de nanopartículas magnéticas com um coagulante de extrato natural no tratamento primário de águas residuais de limpeza no local de laticínios. **Journal of cleaner production**, v. 243, 2020.

VALVERDE, K. C.; COLDEBELLA, P. F.; NISHI, L.; DOS SANTOS, T. R. T. Otimização dos parâmetros de operação no processo de coagulação, floculação e sedimentação no tratamento de água com a associação PAC e *Moringa oleifera* Lam. **Engevista**, v. 17, n. 4, 2015.

VALVERDE, K. C.; COLDEBELLA, P. F.; SILVA, M. F. et al. Estudo de classificação de águas superficiais através da associação dos coagulantes *Moringa oleifera* Lam e cloreto de polialumínio. **e-xacta**, v. 9, n. 2, p. 1–8, 2016.

VALVERDE, K. C.; MORAES, L. C. K.; BONGIOVANI, M. C. Diagrama de coagulação usando *Moringa oleifera* e o sulfato de alumínio, visando a remoção de cor e turbidez da água. **Acta Sci. Technol.**, v. 5, p. 485–489, 2013.

VALVERDE, K. C.; PACCOLA, E. A.; POMINI, A. M. Tratamento de água com extrato natural de *Moringa oleifera* Lam associado a um coagulante sintético. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 3, p. 1, 2018.

VIEIRA, A. M. S.; VIEIRA, M. F.; SILVA, G. F. et al. Uso de sementes de *Moringa oleifera* como adsorvente natural para tratamento de águas residuais. **Water Air Soil Pollut.**, v. 206, p. 273–281, 2010.

VIJAYARAGHAVAN, G.; SIVAKUMAR, T.; VK. Aplicação de coagulantes à base de plantas para tratamento de águas residuais. **Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.**, 2011, v. 1.

VILLASEÑOR BASULTO, D. L.; ASTUDILLO-SÁNCHEZ, P. D.; DEL REAL-OLVERA, J.; BANDALA, E. R. Tratamento de águas residuais usando sementes de *Moringa oleifera* lam: uma revisão. **J. Water Process Eng.**, v. 23, p. 151–164, 2018.

WAN, J.; CHAKRABORTY, T.; XU, C. C.; RAY, M. B. Tratamento para água de lagoa de rejeitos usando *Opuntia ficus-indica* como coagulante. **Sep. Purif. Technol.**, v. 211, p. 448–455, 2019.

YANG, K.; WANG, G.; CHEN, X.; WANG, X.; LIU, F. Tratamento de águas residuais contendo Cu^{2+} usando um novo floculante quelante de metais pesados macromoleculares. **Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.**, v. 558, p. 384–391, 2018.

YANG, Z.; GAO, B.; YUE, Q. Desempenho de coagulação de alumínio residual de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e cloreto de polialumínio (PAC) no tratamento de água do Rio Amarelo. **Chem. Eng. J.**, v. 165, n. 1, p. 122–132, 2010.

YAO, M.; NAN, J.; CHEN, T. Efeito do tamanho de partículas na turbidez sob vários níveis de qualidade da água durante processos de floculação. **Desalination**, v. 354, p. 116–124, 2014.

YIN, C. Y. Uso emergente de coagulantes à base de plantas para tratamento de água e esgoto. **Process biochemistry**, v. 45, p. 1437–1444, 2010.

ZAID, A. Q. A.; GHAZALI, S. B. Investigação preliminar do tratamento de água usando pó de sementes de *Moringa oleifera* como coagulante natural: um estudo de caso do Rio Belat, Malásia. **Malaios**, v. 8, n. 2, p. 79–85, 2019.

ZHAN, X.; GAO, B.; YUE, Q.; WANG, Y.; WANG, Q. Eficiência de coagulação do cloreto de polialumínio para remoção de matéria orgânica natural de águas

superficiais de baixa abs. UV_{254nm} e os efeitos subsequentes na decomposição do cloro. **Chem. Eng. J.**, v. 161, n. 1–2, p. 60–67, 2010.

ZHANG, G.; HUANG, K.; JIANG, X.; HUANG, D.; YANG, Y. Acetilação de palha de arroz para aplicações termoplásticas. **Carbohydr. Polym.**, v. 96, p. 218–226, 2013.

ZHAO, C.; ZHOU, J.; YAN, Y.; XING, G.; LI, H.; WANG, M. Aplicação de coagulação/floculação no tratamento de águas residuais oleosas: uma revisão. **Science of the total environment**, v. 765, 2021.

ZHAO, Y. X.; GAO, B. Y.; SHON, H. K.; WANG, Y.; KIM, J. H.; YUE, Q. Y.; BO, X. W. Biofloculante composto polimérico aniônico como auxiliar de coagulação com sulfato de alumínio e tetracloreto de titânio. **Bioresour. Technol.**, v. 108, p. 45–54, 2012.

ZHOU, Z.; YANG, Y.; LI, X.; JI, S.; ZHANG, H.; WANG, S. Características de remoção de matéria orgânica natural na reciclagem de lodo de tratamento de água potável: papel dos orgânicos solubilizados. **Ultrason. Sonochem.**, v. 28, p. 259–268, 2016.