

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS MACAU

JORDYSON LUIZ OLIVEIRA DA SILVA

COMPARAÇÃO DE COAGULANTES NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ EM ÁGUA: UMA
AVALIAÇÃO DA *MORINGA OLEIFERA*

Macau/RN
2026

JORDYSON LUIZ OLIVEIRA DA SILVA

COMPARAÇÃO DE COAGULANTES NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ EM ÁGUA: UMA
AVALIAÇÃO DA *MORINGA OLEIFERA*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso Tecnologia em Processos Químicos
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Norte, em
cumprimento às exigências legais como
requisito parcial à obtenção do título de
Tecnólogo em Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Soares Braga

Silva, Jordyson Luiz Oliveira da.
S586c Comparação de coagulantes na remoção de turbidez em água: uma avaliação da *Moringa oleifera*. / Jordyson Luiz Oliveira da Silva. – 2026.
56 f. il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Macau, 2026.

Orientador(a): Prof. Dr. Glauco Soares Braga.

1. *Moringa oleifera*. 2. Coagulação. 3. Floculação. 4. Turbidez. 5. Tratamento de água. I Título.

SIBi/IFRN

CDU: 628.16.065.2-927

JORDYSON LUIZ OLIVEIRA DA SILVA

COMPARAÇÃO DE COAGULANTES NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ EM ÁGUA: UMA
AVALIAÇÃO DA *MORINGA OLEIFERA*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso Tecnologia em Processos Químicos
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Norte, em
cumprimento às exigências legais como
requisito parcial à obtenção do título de
Tecnólogo em Processos Químicos.

Aprovado em: 15/07/2026

Banca Examinadora

Prof. Dr. Glauco Soares Braga - Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Igor Micael Alves Uchoa - Examinador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Mailon Aguiar de Lima - Examinador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da vida e por acreditarem em meu potencial mesmo nos momentos mais difíceis. Dedico também aos meus familiares e amigos, que estiveram presentes durante toda essa trajetória acadêmica, oferecendo incentivo e motivação para que este objetivo fosse alcançado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, determinação e sabedoria para enfrentar os desafios encontrados ao longo desta formação.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio constante, incentivo e confiança depositada em mim durante toda minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco Soares Braga, pela orientação, disponibilidade, paciência e contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao IFRN Campus Macau, pela infraestrutura laboratorial disponibilizada para a realização dos experimentos, bem como pelo fornecimento dos materiais utilizados na pesquisa.

Aos técnicos do laboratório pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos, pelo companheirismo, incentivo e apoio durante todo o período do curso.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a conclusão desta pesquisa e para minha formação acadêmica e profissional.

*“O importante é não parar de questionar; a
curiosidade tem sua própria razão de existir.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

A turbidez é um dos principais parâmetros de qualidade da água, estando associada à presença de partículas suspensas que podem comprometer sua utilização e tratamento. Nesse contexto, a coagulação/floculação constitui uma etapa fundamental nos processos convencionais de tratamento de água, sendo o sulfato de alumínio um dos coagulantes mais empregados. Entretanto, a busca por alternativas sustentáveis tem impulsionado estudos envolvendo coagulantes naturais, entre eles a *Moringa oleifera*, cujas sementes apresentam proteínas com potencial coagulante. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da *Moringa oleifera* na remoção de turbidez de água sintética, utilizando o sulfato de alumínio como parâmetro de comparação. Para os testes, foi preparada uma água sintética a partir da dispersão da argila bentonita em água destilada. Ensaios preliminares em bancada foram realizados para determinar as faixas de dosagem mais promissoras dos coagulantes. Para o sulfato de alumínio, a concentração ótima foi estabelecida em $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, enquanto para a *Moringa oleifera* foi determinada a dosagem de $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Posteriormente, foram realizados ensaios confirmatórios em equipamento Jar Test, empregando água sintética com turbidez inicial de 125 NTU e pH de 7,2. Nos ensaios confirmatórios, o sulfato de alumínio apresentou turbidez residual média de 8,4 e 9,1 NTU, correspondendo a eficiências de remoção de 93,3% e 92,8%, respectivamente. A *Moringa oleifera* apresentou turbidez residual média de 10,2 e 27,7 NTU, com eficiências de remoção de 91,9% e 78,1%. Apesar da maior variabilidade observada entre as repetições do coagulante natural, os resultados demonstraram que a *Moringa oleifera* possui elevado potencial para remoção de turbidez, alcançando desempenho próximo ao obtido com o sulfato de alumínio. Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade da utilização da *Moringa oleifera* como coagulante natural no tratamento de águas com elevada turbidez, destacando seu potencial como alternativa sustentável aos coagulantes químicos convencionais.

Palavras-chave: *Moringa oleifera*; Coagulação; Floculação; Turbidez; Tratamento de água; Coagulante natural.

ABSTRACT

Turbidity is one of the main water quality parameters and is associated with the presence of suspended particles that may impair water use and treatment processes. In this context, coagulation/flocculation is a fundamental step in conventional water treatment systems, with aluminum sulfate being one of the most widely used coagulants. However, the search for sustainable alternatives has encouraged studies involving natural coagulants, including *Moringa oleifera*, whose seeds contain proteins with coagulating properties. Therefore, the present study aimed to evaluate the efficiency of *Moringa oleifera* in removing turbidity from synthetic water, using aluminum sulfate as a reference coagulant. For the experiments, synthetic water was prepared by dispersing bentonite clay in distilled water. Preliminary bench-scale tests were carried out to determine the most promising dosage ranges for the coagulants. The optimum concentration for aluminum sulfate was established at $32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, while the optimum dosage for *Moringa oleifera* was determined to be $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Subsequently, confirmatory tests were performed using a Jar Test apparatus with synthetic water presenting an initial turbidity of 125 NTU and a pH of 7.2. In the confirmatory tests, aluminum sulfate achieved average residual turbidity values of 8.4 and 9.1 NTU, corresponding to removal efficiencies of 93.3% and 92.8%, respectively. *Moringa oleifera* achieved average residual turbidity values of 10.2 and 27.7 NTU, with removal efficiencies of 91.9% and 78.1%, respectively. Despite the greater variability observed between replicates of the natural coagulant, the results demonstrated that *Moringa oleifera* has a high potential for turbidity removal, achieving performance close to that obtained with aluminum sulfate. The findings highlight the feasibility of using *Moringa oleifera* as a natural coagulant for the treatment of highly turbid waters, emphasizing its potential as a sustainable alternative to conventional chemical coagulants.

Keywords: *Moringa oleifera*; Coagulation; Flocculation; Turbidity; Water treatment; Natural coagulant.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma típico da tecnologia de tratamento convencional	19
Figura 2 - Representação esquemática do processo de clarificação da água.....	19
Figura 3 - Árvore de <i>Moringa oleifera</i>	25
Figura 4 - Síntese das etapas dos procedimentos metodológicos	31
Figura 5 - Esquema dos jarros no FlocControl.....	37
Figura 6 - Comparação visual entre as águas sintéticas	40
Figura 7 - Aspecto visual da suspensão de <i>Moringa oleifera</i> (esquerda) e da solução de sulfato de alumínio (direita) utilizadas nos ensaios.....	41
Figura 8 - Etapas de preparação das sementes de <i>Moringa oleifera</i> para obtenção do coagulante: (a) sementes in natura; (b) sementes após secagem e descascamento; (c) sementes trituradas; e (d) sementes peneiradas.....	42
Figura 9 - Ensaio confirmatório em Jar Test para avaliação dos coagulantes estudados.	48
Gráfico 1 - Variação de turbidez ao longo do tempo	39
Gráfico 2 - Eficiência de remoção de turbidez em função das dosagens de SA	44
Gráfico 3 - Eficiência de remoção de turbidez em função da dosagem de MO	46
Gráfico 4 - Eficiência de remoção obtidas em Jar Test	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre a dosagem SA aplicada.....	35
Tabela 2 – Faixa Ampliada de dosagem do SA.....	35
Tabela 3 - Relação entre a dosagem de MO aplicada.....	36
Tabela 4 – Faixa de refinamento da dosagem de MO	36
Tabela 5 - Relação entre a dosagem SA aplicada.....	43
Tabela 6 - Resultados de turbidez e pH obtidos nos ensaios com <i>Moringa oleífera</i>	45
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de refinamento da faixa entre 360 e 420 mg·L ⁻¹	47
Tabela 8 - Resultados dos ensaios confirmatórios em Jar Test	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Contr.	Controle
g	Grama
h	Hora
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
m/v	Massa por volume
mg·L ⁻¹	Miligramas por litro
min.	Minuto
mL	Mililitro
MO	<i>Moringa oleifera</i>
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Unidade de Turbidez Nefelométrica)
pH	Potencial hidrogeniônico
RPM	Rotações por minuto
s	Segundo
SA	Sulfato de Alumínio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 DISPONIBILIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA	17
2.2 TRATAMENTO DE ÁGUA.....	18
2.2.1 Clarificação	19
2.2.2 Filtração.....	22
2.2.3 Desinfecção	23
2.3 COAGULANTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA	23
2.3.1 <i>Moringa oleifera</i> como coagulante natural.....	24
2.3.2 Estudos sobre a utilização da <i>Moringa oleifera</i> como coagulante natural	26
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
3.1 PREPARAÇÃO DA ÁGUA SINTÉTICA.....	31
3.2 PREPARAÇÃO DOS COAGULANTES	32
3.2.1 Sulfato de alumínio.....	32
3.2.2 <i>Moringa oleifera</i>	33
3.3 TESTES INICIAIS PARA DOSAGEM ÓTIMA	33
3.3.1 Sulfato de alumínio.....	34
3.3.2 <i>Moringa oleifera</i>	35
3.4 ENSAIO CONFIRMATÓRIO EM JAR TEST	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 ANÁLISE DA ÁGUA SINTÉTICA	39
4.2 COAGULANTES.....	40
4.3 TESTES INICIAIS PARA DOSAGEM ÓTIMA	42
4.3.1 Sulfato de Alumínio	42
4.3.2 <i>Moringa oleifera</i>	45
4.4 ENSAIO CONFIRMATÓRIO EM JAR TEST	47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital e indispensável à sobrevivência da humanidade. No entanto, o acelerado crescimento populacional, aliado à intensificação dos processos de industrialização, tem comprometido a disponibilidade de água em condições adequadas para consumo (KAKKAR *et al.*, 2025). Essa poluição, causada principalmente pela poluição doméstica, agrícola e industrial, tem acarretado impactos negativos tanto na saúde humana quanto no meio ambiente (ADDICH *et al.*, 2022).

Segundo Ritchie *et al.* (2019), a utilização de água contaminada é responsável por mais de um milhão de mortes anualmente, contribuindo para a proliferação de doenças como cólera, diarreia, hepatite A, febre tifoide e poliomielite. Além disso, o consumo dessa água agrava quadros de desnutrição e está diretamente associado ao atraso no crescimento infantil. Esses impactos tornam-se ainda mais severos em países subdesenvolvidos, onde a precariedade dos sistemas de saneamento básico, a limitada disponibilidade de fontes de água potável e a deficiência na fiscalização ambiental e sanitária intensificam os riscos à saúde.

Diante desse cenário, a busca por alternativas sustentáveis, eficientes e de baixo custo para o tratamento da água surge como uma demanda essencial, especialmente para comunidades com acesso limitado a tecnologias convencionais, o que reforça a importância de estudos voltados à melhoria dos processos de tratamento e à utilização de materiais naturais como agentes auxiliares.

Para a produção de água limpa, seja potável e residual, os processos de coagulação e floculação são as etapas iniciais da maioria dos processos de tratamento de água. Sendo fundamentais para a remoção de partículas em suspensão, matéria coloidal e parte da carga orgânica presente na água bruta. Nessa etapa se faz o uso de substâncias específicas, conhecidas como coagulantes e floculantes, que atuam diretamente na remoção da turbidez da água (ADDICH *et al.*, 2024). Os coagulantes são capazes de alterar o equilíbrio eletrostático do meio ao introduzirem uma carga oposta àquelas associadas às moléculas coloidais, neutralizando suas forças de repulsão e facilitando sua aproximação, formando agregados com aspecto gelatinoso. Na etapa subsequente, a floculação promove o crescimento desses agregados, aumentando sua massa e densidade, o que resulta em flocos maiores e mais estáveis, facilitando sua remoção por sedimentação em águas residuárias. Os coagulantes mais utilizados para tratamento de água são os a base de alumínio, devido principalmente a sua eficiência comprovada e baixo custo. Entretanto, estudos recentes destacam que, principalmente em dosagens irregulares, esses compostos podem estar relacionados ao desenvolvimento do Alzheimer. A geração de lodos não compostáveis e o elevado custo do tratamento também são

outros fatores limitantes. Neste contexto, a busca por coagulantes naturais, não tóxicos, de baixo custo e fácil acesso, têm se tornado cada vez mais fontes de pesquisas nas últimas décadas (KAKKAR *et al.*, 2025).

Os coagulantes naturais empregados no tratamento de águas residuárias podem ser classificados, de modo geral, em três grupos principais, de acordo com sua origem: animal, microbiana e vegetal. Entre esses destaca-se a semente da *Moringa oleifera* (MO), sendo uma alternativa que vem sendo cada vez mais estudada frente aos coagulantes metálicos comumente utilizados. As sementes contêm proteínas catiônicas solúveis, além de peptídeos, cálcio, ferro, vitamina C e tocoferol, responsáveis pelo mecanismo de neutralização de cargas e adsorção das partículas coloidais presentes na água. Esse processo favorece a agregação e sedimentação dos contaminantes, promovendo elevada eficiência na remoção de turbidez e matéria orgânica. Assim, a MO apresenta vantagens significativas, como baixo custo, menor geração de lodo, sendo esse ainda biodegradável e menor risco de impactos ambientais e à saúde humana quando comparada aos coagulantes à base de alumínio ou ferro. Essas características a tornam especialmente promissora para aplicação em sistemas de tratamento simplificados, comunidades rurais e regiões com recursos financeiros e infraestrutura limitados (ADDICH *et al.*, 2024).

Diante das características promissoras apresentadas, torna-se necessário aprofundar sua avaliação por meio de estudos comparativos que permitam mensurar, de forma objetiva, sua eficiência em relação aos coagulantes convencionalmente utilizados no tratamento de água. A realização de ensaios em condições experimentais controladas, como o emprego de água sintética com turbidez previamente estabelecida, é fundamental para reduzir a interferência de variáveis externas e assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados. Nesse contexto, o presente trabalho delimita-se à análise comparativa do desempenho da *Moringa oleifera* frente ao sulfato de alumínio nos processos de coagulação e floculação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar a eficiência da *Moringa oleifera* frente ao sulfato de alumínio na remoção de turbidez de água sintética, em condições laboratoriais controladas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar diferentes concentrações de *Moringa oleifera* em ensaios preliminares em bancada, tomando como referência a faixa definida para o sulfato de alumínio.
- Confirmar as dosagens ótimas de ambos os coagulantes por meio de ensaios em *Jar Test* (1L), realizados em duplicata, com inclusão de jarro controle (branco).
- Comparar a eficiência dos coagulantes com base na remoção de turbidez e nas variações de pH observadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DISPONIBILIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA

A disponibilidade de água potável é um dos fatores fundamentais para a promoção da saúde pública e para a melhoria da qualidade de vida das populações. Apesar dos avanços tecnológicos e da ampliação dos sistemas de abastecimento nas últimas décadas, o acesso à água segura ainda não é universal, especialmente em países em desenvolvimento (ALI *et al.*, 2010). Vale dizer que, embora aproximadamente 70% da superfície terrestre seja coberta por água, apenas uma pequena fração desse volume é adequada para consumo humano. Cerca de 3% da água existente no planeta é doce, e grande parte desse percentual encontra-se armazenada em geleiras ou em reservatórios naturais de difícil acesso, o que limita significativamente sua disponibilidade para uso direto pela população (WWF, 2024).

Em consequência dessa limitação, bilhões de pessoas enfrentam dificuldades no acesso à água. Estima-se que aproximadamente 1,1 bilhão de indivíduos no mundo não possuam acesso regular à água potável, enquanto cerca de 2,7 bilhões enfrentam escassez hídrica em pelo menos um período do ano e aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas vivem em condições inadequadas de saneamento, o que favorece a disseminação de doenças de veiculação hídrica, como cólera, febre tifoide e diversas infecções gastrointestinais (WWF, 2024).

Outro fator agravante é a crescente degradação dos recursos hídricos. Processos como urbanização acelerada, expansão agrícola, atividades industriais e descarte inadequado de resíduos têm provocado a contaminação de rios, lagos e aquíferos. (DEVELOPMENTAID, 2025). Entre as principais fontes de poluição hídrica destacam-se o lançamento de efluentes industriais, o escoamento de fertilizantes e pesticidas provenientes da agricultura, o despejo de águas residuais sem tratamento e a contaminação por resíduos sólidos, especialmente plásticos. Esses poluentes podem introduzir compostos tóxicos, metais pesados e microrganismos patogênicos nos ambientes aquáticos, representando riscos significativos à saúde humana e à biodiversidade (DEVELOPMENTAID, 2025).

No contexto brasileiro, observa-se uma expansão progressiva da cobertura dos serviços de abastecimento de água. Dados recentes indicam que, em 2023, aproximadamente 85,9% dos domicílios do país estavam conectados à rede geral de abastecimento. Entretanto, essa cobertura apresenta diferenças expressivas entre áreas urbanas e rurais. Enquanto nos centros urbanos cerca de 93,4% das residências são atendidas pela rede pública, nas zonas rurais esse percentual é significativamente menor, alcançando cerca de 32,3% dos domicílios. Entre

as regiões brasileiras, a cobertura da rede geral varia consideravelmente, sendo mais elevada no Sudeste e menor na região Norte (GOMES e BRITTO, 2023).

As dificuldades para ampliar a infraestrutura de abastecimento em áreas rurais estão associadas a fatores como a dispersão das moradias, a baixa densidade populacional e os custos elevados para implantação e manutenção de sistemas convencionais de tratamento e distribuição de água. Essas condições podem limitar a presença de estações de tratamento e dificultar a chegada da água tratada a comunidades mais isoladas. Como consequência, muitas populações acabam utilizando fontes de água bruta sem tratamento adequado (MICHELAN *et al.*, 2021).

2.2 TRATAMENTO DE ÁGUA

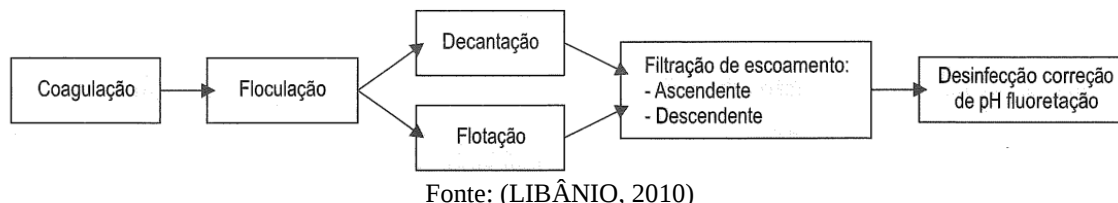
Segundo Libânio (2010), o tratamento de água tem como objetivo remover partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias potencialmente prejudiciais à saúde humana presentes nas águas naturais. Para isso, são empregadas tecnologias que buscam conciliar eficiência na melhoria da qualidade da água com custos viáveis de implantação, operação e manutenção, além de minimizar impactos ambientais.

Nesse contexto, a definição das tecnologias a serem utilizadas em um sistema de tratamento deve considerar diversos fatores relacionados às condições locais e às características da água bruta. Entre os principais aspectos analisados estão as propriedades físico-químicas da água a ser tratada, os custos de implantação, operação e manutenção das unidades de tratamento, a confiabilidade e o manuseio dos equipamentos, além da flexibilidade operacional do sistema. Também devem ser considerados fatores como a localização geográfica da comunidade atendida e as alternativas disponíveis para a disposição final do lodo gerado durante o processo (LIBÂNIO, 2010). A partir da avaliação desses critérios, são definidas as tecnologias mais adequadas, que normalmente se estruturam em diferentes etapas operacionais responsáveis pela remoção progressiva das impurezas presentes na água bruta.

As tecnologias de tratamento são geralmente organizadas em três fases principais: clarificação, filtração e desinfecção. Dependendo da qualidade da água bruta, algumas dessas etapas podem não ser necessárias, como ocorre em muitos mananciais subterrâneos, nos quais apenas a desinfecção pode ser suficiente para atender aos padrões de potabilidade. Quando a água apresenta maior presença de partículas, inclui-se a etapa de clarificação para reduzir a carga de sólidos antes da filtração. Assim, as etapas do tratamento funcionam como barreiras sucessivas que promovem a remoção progressiva de partículas e microrganismos da água

(LIBÂNIO, 2010). As etapas que compõem o tratamento convencional e sua sequência de aplicação podem ser visualizadas na Figura 1.

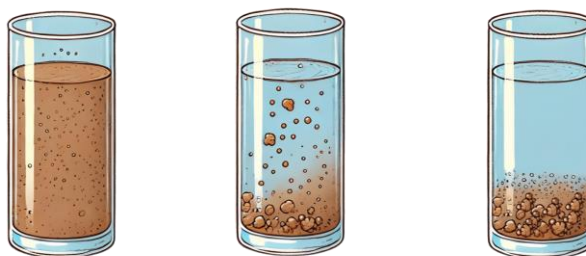
Figura 1 - Fluxograma típico da tecnologia de tratamento convencional



2.2.1 Clarificação

A clarificação corresponde à primeira etapa no tratamento de água, sendo responsável pela remoção de grande parte dos sólidos suspensos. Esse processo envolve as etapas de coagulação, floculação e sedimentação, que promovem a desestabilização das partículas, a formação de flocos e sua posterior separação da água. De forma esquemática, a evolução da água ao longo dessas etapas, desde a condição inicial até a formação e sedimentação dos flocos, é representada na Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática do processo de clarificação da água



Fonte: (GUILHERME, 2024)

A coagulação é um processo empregado no tratamento de água para auxiliar na remoção de partículas suspensas e dissolvidas presentes na água. Essas partículas estão frequentemente relacionadas a características indesejáveis, como cor, turbidez, sabor e odor, além de poderem estar associadas à presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos (SANTOS, 2022). Segundo Libânio (2010), o processo ocorre pela adição de um coagulante, geralmente sais de alumínio ou ferro, que reagem rapidamente com a água e com as impurezas presentes. Essas reações químicas provocam a formação de espécies hidrolisadas e, em determinadas condições, de precipitados que auxiliam na neutralização das cargas das partículas.

O autor também destaca que esse material apresenta, em sua maioria, carga superficial predominantemente negativa, característica que favorece a estabilidade da suspensão devido às forças de repulsão eletrostática entre os elementos dispersos. Ao redor dessas estruturas forma-se uma camada denominada dupla camada elétrica, constituída por íons presentes na solução e atraídos pela carga superficial. A distribuição desses íons resulta no desenvolvimento de potenciais elétricos, entre os quais se destaca o potencial zeta, utilizado como indicador da magnitude da carga superficial e da estabilidade do sistema coloidal.

A coagulação atua justamente na redução dessa estabilidade, permitindo que as partículas se aproximem e posteriormente se agreguem. Entre os mecanismos responsáveis pela desestabilização estão a compressão da dupla camada, a adsorção e neutralização das cargas, a coagulação por varredura e a formação de pontes químicas. Esses mecanismos podem ocorrer simultaneamente, dependendo das características da água, do coagulante empregado, de sua concentração e das condições de pH do meio (LIBÂNIO, 2010).

Na compressão da dupla camada, o aumento da concentração de íons na solução provoca a redução da espessura da camada difusa que envolve as partículas. Íons positivos, especialmente aqueles de maior carga, podem reduzir a magnitude do potencial zeta e favorecer a aproximação entre os agregados. Entretanto, esse mecanismo não explica isoladamente todos os fenômenos observados durante a coagulação, uma vez que as interações entre as espécies químicas do coagulante e as partículas também exercem papel importante (LIBÂNIO, 2010).

Outro mecanismo importante é a adsorção e neutralização de cargas. Após a dispersão do coagulante na água, podem ser formadas espécies hidrolisadas com carga positiva, dependendo principalmente do pH do meio. Essas espécies podem ser adsorvidas na superfície das partículas, reduzindo sua carga negativa e, conseqüentemente, as forças de repulsão entre elas. Dessa maneira, torna-se possível a aproximação das partículas e sua posterior agregação. No caso dos sais de alumínio e ferro, as espécies formadas pela hidrólise apresentam papel mais relevante na coagulação do que os próprios íons metálicos isoladamente (LIBÂNIO, 2010).

Na coagulação por varredura, a elevação da dosagem do coagulante e as condições aquedadas de pH favorecem a formação de precipitados de hidróxidos de alumínio ou ferro. As partículas suspensas e coloidais podem ser adsorvidas ou envolvidas por esses precipitados, formando estruturas maiores e mais pesadas, que apresentam maior facilidade de remoção por sedimentação (LIBÂNIO, 2010).

A ocorrência desses mecanismos está diretamente relacionada às condições químicas da água. Fatores como dosagem do coagulante, valor de pH, alcalinidade e o tipo de coagulante

exercem influência significativa na remoção de turbidez e cor da água, sendo fundamentais para a otimização do processo (SANTOS, 2022).

Libânio (2010) também observa que, embora as características da água bruta influenciam na escolha do produto químico, o sucesso da coagulação depende principalmente do tipo de coagulante utilizado e de sua capacidade de formar espécies hidrolisadas no meio aquoso, responsáveis por promover a desestabilização das partículas suspensas e coloidais presentes na água. Substâncias que apenas se dissociam em íons simples, sem formar essas espécies hidrolisadas, não apresentam capacidade coagulante efetiva.

Entre os coagulantes mais utilizados no tratamento de água destacam-se principalmente os sais de alumínio e de ferro, como o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso clorado e sulfato férrico, amplamente empregados em estações de tratamento convencionais (LIBÂNIO, 2010). Além das características químicas do coagulante, sua escolha também pode ser influenciada por fatores como custos de aquisição, operação e manutenção do sistema de dosagem, bem como pela qualidade da água tratada obtida ao final do processo. Outro aspecto relevante refere-se à quantidade e às características do lodo gerado durante o tratamento, que dependem tanto das propriedades da água bruta quanto do tipo de coagulante empregado, podendo impactar o manejo e a disposição final desses resíduos (LIBÂNIO, 2010).

A floculação é a etapa que sucede a coagulação no processo de clarificação da água. Nessa fase, as partículas previamente desestabilizadas passam a sofrer colisões entre si, favorecendo sua aglomeração e a formação de estruturas maiores chamadas flocos, que posteriormente poderão ser removidos por sedimentação, flotação ou filtração (SANTOS, 2022).

De acordo com Libânio (2010), a floculação consiste em uma operação física da etapa de clarificação que tem como objetivo reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presentes na água, por meio da aglomeração progressiva dessas partículas. A eficiência desse processo está diretamente relacionada a fatores como gradiente de velocidade, tempo de floculação e condições de mistura, parâmetros que influenciam o tamanho, a densidade e a resistência dos flocos formados.

Durante a floculação, podem ocorrer interações químicas associadas à formação de pontes entre as partículas. Esse mecanismo é particularmente relevante quando estão presentes polímeros ou compostos orgânicos de cadeia longa, que podem ser adsorvidos simultaneamente por diferentes partículas, promovendo sua união. As interações podem envolver forças eletrostáticas, pontes de hidrogênio e forças de Van Der Waals (LIBÂNIO, 2010).

A sedimentação, também conhecida como decantação, é uma etapa amplamente utilizada no tratamento de água para a remoção de partículas sólidas em suspensão. Esse processo baseia-se na ação da gravidade, que promove o deslocamento das partículas mais densas que a água para o fundo dos tanques, possibilitando a separação entre as fases sólida e líquida da água (SANTOS, 2022)

No tratamento convencional, a sedimentação ocorre após as etapas de coagulação e floculação, quando as partículas previamente desestabilizadas se agregam formando flocos maiores e mais densos, que apresentam maior tendência a se depositar no fundo das unidades de decantação (SANTOS, 2022). Dessa forma, essa operação unitária reflete diretamente a eficiência das etapas anteriores do tratamento, pois quanto mais bem formados e densos forem os flocos, maior será a eficiência da remoção de sólidos suspensos (LIBÂNIO, 2010).

A flotação é um processo de separação utilizado no tratamento de água para remover partículas sólidas em suspensão presentes na fase líquida. Diferentemente da sedimentação, em que as partículas se depositam no fundo, na flotação ocorre a ascensão das partículas até a superfície, permitindo sua posterior remoção (ANDRADE, 2015). Esse processo ocorre pela introdução de bolhas de ar no meio líquido, que se aderem às partículas ou aos flocos formados durante as etapas anteriores do tratamento. Quando as bolhas de ar se ligam às partículas sólidas ou aos flocos, ocorre uma redução da densidade aparente dessas estruturas, fazendo com que se tornem mais leves que a água. Dessa forma, sob a ação do empuxo, essas partículas são transportadas para a superfície do líquido, onde podem ser removidas com maior facilidade, contribuindo para a retirada de substâncias em suspensão presentes na água (SANTOS, 2022).

2.2.2 Filtração

A filtração é uma etapa fundamental no tratamento de água, cuja principal função é a remoção de partículas responsáveis pela cor e turbidez, além de parte dos microrganismos ainda presentes após as etapas anteriores do tratamento (LIBÂNIO, 2010). Trata-se de um processo de separação física em que a água atravessa um meio poroso, geralmente constituído por areia, antracito ou combinações desses materiais, permitindo a retenção das partículas em suspensão e promovendo maior clarificação da água (SANTOS, 2022).

Nas estações de tratamento convencionais, a filtração exerce papel essencial por corrigir possíveis falhas ocorridas nas etapas de coagulação, floculação e sedimentação ou flotação, garantindo maior eficiência no processo de potabilização (LIBÂNIO, 2010). Durante a passagem da água pelo meio filtrante, a remoção de partículas ocorre por diferentes mecanismos, como transporte, adesão e desprendimento, que são influenciados por fatores

como as características das partículas, a composição do meio filtrante e a taxa de filtração (SANTOS, 2022).

Os filtros podem ser classificados de acordo com o sentido do fluxo da água, podendo ser ascendentes (de baixo para cima) ou descendentes (de cima para baixo), sendo esta última configuração a mais comum. No Brasil, predominam filtros de areia ou de camada dupla (areia e antracito), apoiados sobre uma camada-suporte de cascalho ou pedregulho, que auxilia na distribuição do fluxo e sustentação do meio filtrante. Também é comum a utilização de carvão ativado granular com o objetivo de adsorver compostos orgânicos capazes de conferir odor e sabor à água (LIBÂNIO, 2010). Dessa forma, a filtração complementa as etapas anteriores do tratamento, contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade da água tratada.

2.2.3 Desinfecção

A desinfecção constitui a etapa final do tratamento de água destinada ao consumo humano, tendo como principal objetivo inativar microrganismos patogênicos que ainda possam estar presentes após as etapas de clarificação e filtração. Embora processos anteriores, como sedimentação e filtração, contribuam para a redução de microrganismos ao remover partículas suspensas, não é essa a sua função principal. Dessa forma, cabe à desinfecção garantir a segurança microbiológica da água, além de evitar o crescimento de microrganismos ao longo das redes de distribuição (LIBÂNIO, 2010).

Esse processo pode ser realizado por agentes químicos ou físicos. Entre os agentes químicos mais utilizados destacam-se o cloro, dióxido de cloro e ozônio, que atuam principalmente por meio de reações de oxidação. Já os métodos físicos incluem o uso de radiação ultravioleta, radiação solar ou fervura, que também são capazes de inativar microrganismos presentes na água (LIBÂNIO, 2010).

Segundo Libânio (2010), a ação dos desinfetantes ocorre principalmente por três mecanismos: ruptura da parede celular dos microrganismos, difusão do agente desinfetante para o interior da célula ou interferência nos processos de reprodução celular. Dessa forma, os microrganismos tornam-se incapazes de se multiplicar ou causar doenças, garantindo a potabilidade da água.

2.3 COAGULANTES NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Os coagulantes químicos, especialmente os à base de alumínio, são amplamente utilizados no tratamento de água devido à sua elevada eficiência na remoção de partículas e ao baixo custo de aplicação. Entre eles, o sulfato de alumínio destaca-se como o coagulante mais

empregado no Brasil (CARDOSO *et al.*, 2008). No entanto, o uso prolongado de compostos de alumínio tem sido objeto de discussão científica, uma vez que alguns estudos sugerem uma possível relação entre a ingestão de alumínio e o desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como o Mal de Alzheimer (SILVA, 2012).

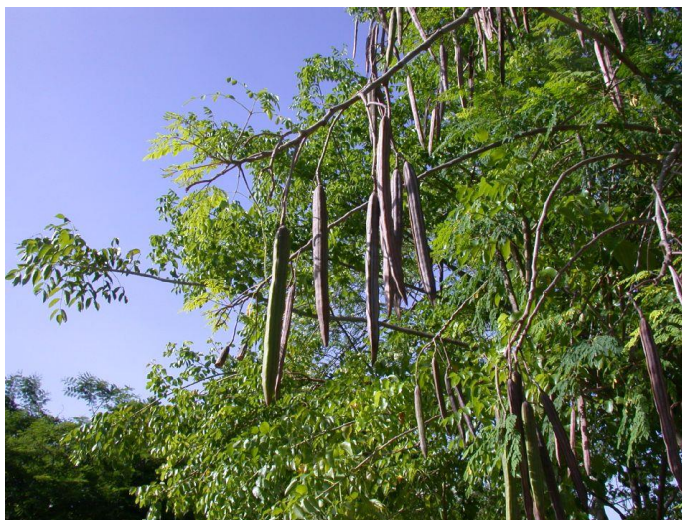
Diante desse cenário, diversos estudos têm buscado alternativas aos coagulantes químicos, destacando-se os coagulantes naturais de origem vegetal. Esses materiais apresentam vantagens como biodegradabilidade, baixa toxicidade e menor produção de lodo residual, o que os torna ambientalmente mais sustentáveis (CARDOSO *et al.*, 2008). Entre as substâncias naturais estudadas como coagulantes ou auxiliares de coagulação estão produtos ricos em polissacarídeos, proteínas e amidos, como farinha de mandioca, araruta e fécula de batata, que podem melhorar a eficiência na remoção de sólidos suspensos (SILVA, 2012).

Além desses materiais, a utilização de plantas como fonte de coagulantes naturais tem sido investigada em diversos países, principalmente na Ásia, África e América do Sul. Entre as espécies estudadas, a *Moringa oleifera* destaca-se como uma das mais promissoras para aplicação no tratamento de águas turvas e coloridas, devido à sua capacidade de promover a aglomeração de partículas suspensas (SILVA, 2012).

2.3.1 *Moringa oleifera* como coagulante natural

A *Moringa oleifera* é uma planta da família Moringaceae, originária do nordeste da Índia e atualmente amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais do mundo, incluindo África, Ásia e América Latina (FRANCO, 2010). No Brasil, é conhecida popularmente como lírio-branco ou quiabo-de-quina, sendo uma espécie de crescimento rápido, adaptável a diferentes condições climáticas e capaz de se desenvolver mesmo em solos pobres e regiões semiáridas, características que favorecem seu cultivo no Nordeste brasileiro (SANTOS, 2022; SILVA, 2008). Na Figura 3, apresenta-se um espécime de *Moringa oleifera*, permitindo observar algumas de suas características morfológicas.

Figura 3 - Árvore de *Moringa oleifera*



Fonte: (MED-HEALTH.NET, 2013)

Além de seus diversos usos na alimentação, medicina e agricultura, a MO tem ganhado destaque na área ambiental devido ao potencial de suas sementes como coagulante natural no tratamento de água. O pó obtido das sementes possui proteínas catiônicas hidrossolúveis capazes de desestabilizar partículas coloidais presentes na água, promovendo sua agregação e formação de flocos que posteriormente podem ser removidos por sedimentação ou filtração (SILVA, 2012).

Segundo Addich *et al.* (2020), a ação coagulante MO está relacionada à presença de compostos de elevada massa molecular e à abundância de sítios de ligação, que possibilitam interações com as partículas suspensas e a matéria orgânica dissolvida presente na água. O mecanismo de coagulação ocorre principalmente por neutralização de cargas e floculação por varredura, reduzindo as forças de repulsão entre as partículas e favorecendo sua agregação. Essas interações químicas contribuem para a formação e o crescimento dos flocos, facilitando a remoção das partículas suspensas por sedimentação.

Estudos indicam que o uso de suas sementes pode apresentar eficiência comparável à de coagulantes químicos, como o sulfato de alumínio, especialmente na remoção de turbidez e cor da água (SILVA, 2012; KAKKAR *et al.*, 2025). Em alguns casos, foram observadas remoções médias de aproximadamente 95% da turbidez e 90% da cor aparente, demonstrando sua eficácia no processo de clarificação (FRANCO, 2010). Além disso, pesquisas também apontam que os compostos presentes nas sementes podem apresentar atividade antimicrobiana, contribuindo para a redução de algumas bactérias presentes na água (SILVA, 2012; KAKKAR *et al.*, 2025).

Entretanto, algumas limitações também devem ser consideradas. A eficiência do coagulante natural pode variar conforme a turbidez inicial da água e a dosagem utilizada, sendo geralmente mais eficaz em águas com maior turbidez. Além disso, o uso das sementes pode introduzir matéria orgânica adicional no meio, o que pode influenciar etapas posteriores do tratamento, como a filtração (FRANCO, 2010).

Outro aspecto relevante refere-se à durabilidade das propriedades coagulantes das sementes. Estudos indicam que o potencial coagulante da *Moringa Oleifera* pode diminuir ao longo do tempo de armazenamento, especialmente quando as sementes são mantidas em condições inadequadas de temperatura e umidade. Mesmo quando armazenadas sob refrigeração, observa-se redução gradual da eficiência na remoção de turbidez após alguns meses, enquanto em condições ambientes essa perda pode ocorrer de forma ainda mais rápida (SILVA, 2012; KAKKAR et al., 2025).

2.3.2 Estudos sobre a utilização da *Moringa oleifera* como coagulante natural

A utilização da *Moringa oleifera* como coagulante natural tem sido investigada em diferentes condições de tratamento de água e efluentes, envolvendo variações na forma de preparo, concentração do coagulante, condições de mistura, tempo de decantação e associação com etapas de filtração. Esses estudos têm buscado avaliar não apenas a capacidade da MO de promover a remoção de turbidez e cor, mas também aspectos relacionados à estabilidade do processo, às características do lodo gerado e às possibilidades de aplicação em diferentes sistemas de tratamento. Nesse contexto, os resultados apresentados na literatura permitem identificar as principais condições que influenciam o desempenho do coagulante e contribuem para a compreensão de seu potencial como alternativa aos coagulantes convencionais.

Addich *et al.* (2024) estudaram a utilização do pó de sementes de *Moringa oleifera* como coagulante no tratamento de água residual urbana, investigando diferentes dosagens entre 0,1 e 0,5 g/500 mL. Os resultados demonstraram que a eficiência de remoção de cor e turbidez aumentou com o acréscimo da dosagem até 0,3 g/500 mL, considerada a concentração ótima no estudo, enquanto dosagens superiores provocaram redução da eficiência, comportamento atribuído ao excesso de espécies catiônicas em relação à quantidade de impurezas presentes na água. Os autores também observaram que a adição inicial da moringa poderia provocar aumento da turbidez, seguido de sua redução durante a sedimentação, fenômeno relacionado ao elevado conteúdo de matéria orgânica presente nas sementes. No estudo, a eficiência máxima de remoção foi de 87,5% para turbidez, 58,8% para DQO e 49,76% para cor. Além disso, os

resultados indicaram maior eficiência do coagulante em condições básicas do que em meio ácido.

Arantes *et al.* (2014) avaliaram o uso de coagulantes naturais à base de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em geotêxtil sintético não tecido, investigando também diferentes formas de preparo da solução coagulante de MO. Os resultados mostraram que o processamento das sementes por meio de pilão seguido de peneiramento do pó e o processamento em máquina de moer com posterior peneiramento apresentaram os melhores desempenhos, proporcionando reduções médias de turbidez de 97,99% e 97,89%, respectivamente, após 30 minutos de sedimentação. Na etapa de filtração, a utilização da *M. oleifera* resultou em reduções de turbidez entre 96 e 99%, embora tenham sido observadas maiores oscilações nos valores ao longo dos ensaios quando comparada ao tanino. Segundo os autores, essa variabilidade pode estar relacionada ao fato de a MO não ser um produto industrializado e padronizado, sendo preparada diretamente a partir das sementes, que podem apresentar diferenças em suas características. Apesar dessa variação, os valores de turbidez permaneceram abaixo de 5 NTU em todos os ensaios realizados com a *M. oleifera*, demonstrando seu potencial como coagulante natural. Em relação ao pH, a aplicação do coagulante provocou apenas pequenas alterações, com os valores passando de uma faixa inicial de 7,2 a 8,6 para valores entre 6,7 e 7,8 após o tratamento.

Arantes *et al.* (2015) compararam duas formas de aplicação do coagulante obtido a partir de sementes de *Moringa oleifera*: na forma líquida e em sachês contendo o pó das sementes. Após as etapas de dispersão das proteínas, coagulação e floculação, foram realizados processos de pré-filtração e filtração lenta. Os resultados demonstraram diferenças significativas entre as formas de aplicação, principalmente quanto à redução da turbidez e da cor aparente. Na etapa de pré-filtração, o coagulante líquido apresentou maior eficiência, com redução média da turbidez de 83%, enquanto os sachês proporcionaram redução de 73%. Entretanto, no filtro lento, observou-se comportamento inverso, com os sachês alcançando redução média de 84%, superior aos 60% obtidos com o coagulante líquido. Considerando o sistema de filtração como um todo, ambas as formas de aplicação apresentaram resultados satisfatórios na redução da turbidez e da cor aparente. Os autores também destacaram como vantagem dos sachês a possibilidade de seu preparo sem a utilização de água, característica que pode favorecer sua aplicação em comunidades rurais ou isoladas onde há disponibilidade limitada de água de qualidade.

Cardoso *et al.* (2008) observaram a influência dos tempos de mistura rápida, mistura lenta e decantação, bem como da concentração de *Moringa oleifera*, na remoção de cor aparente

e turbidez de uma água com valores iniciais de 533 uH e 247 uT, respectivamente. Os resultados demonstraram que as condições de coagulação/floculação e a concentração do coagulante exerceram influência significativa sobre a eficiência do tratamento. Entre as condições avaliadas, o tempo de 3 minutos para mistura rápida e 15 minutos para mistura lenta foi considerado o mais adequado, pois proporcionou boas eficiências de remoção utilizando menores dosagens do coagulante. Para a concentração de 250 mg L^{-1} , por exemplo, foram obtidas remoções de 84,9% de cor e 90,5% de turbidez após 90 minutos de decantação, enquanto, com 120 minutos, esses valores aumentaram apenas para 87,4% e 91,4%, respectivamente. Dessa forma, os autores consideraram 90 minutos como o tempo de decantação ideal, uma vez que o pequeno ganho de eficiência obtido com 120 minutos não justificava o aumento do tempo de tratamento. O estudo concluiu que a *Moringa oleifera* apresentou elevada eficiência na remoção de cor e turbidez, demonstrando potencial para utilização como alternativa ao tratamento convencional na etapa de coagulação/floculação.

Franco (2010) analisou a utilização do coagulante extraído de sementes de *Moringa oleifera* como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas, considerando diferentes dosagens e pontos de aplicação do coagulante. O sistema foi composto por pré-filtro dinâmico, pré-filtros de fluxo ascendente e filtros lentos, sendo avaliadas dosagens de 131 mg L^{-1} na etapa de pré-filtração e de 106 e 53 mg L^{-1} nas etapas de filtração lenta. Na pré-filtração, a aplicação de *M. oleifera* resultou em valores médios de 11 NTU de turbidez e 73 mg L^{-1} PtCo de cor aparente. Na etapa de filtração lenta, a dosagem de 106 mg L^{-1} apresentou os melhores resultados, com valores de 1,15 NTU de turbidez e 11 mg L^{-1} PtCo de cor aparente, enquanto a dosagem de 53 mg L^{-1} resultou em 5 NTU e 42 mg L^{-1} PtCo, respectivamente. De modo geral, a aplicação do coagulante natural melhorou a eficiência do sistema de filtração em múltiplas etapas, principalmente quando realizada na pré-filtração. Entretanto, sua aplicação diretamente no filtro lento provocou rápida colmatção da manta e redução da duração da carreira de filtração, enquanto a passagem da solução pelo floculador granular não apresentou resultados satisfatórios. Assim, os resultados demonstraram que a eficiência do coagulante natural depende não apenas da dosagem empregada, mas também da etapa do tratamento em que o coagulante é aplicado, sendo a pré-filtração apontada como a condição mais favorável no sistema avaliado.

JANZ *et al.* (2020), avaliaram a aplicação de diferentes coagulantes no pós-tratamento de efluente proveniente da indústria cervejeira, comparando-se o extrato de sementes de *Moringa oleifera*, o tanino e o sulfato de alumínio por meio de ensaios de Jar Test. O efluente bruto apresentava pH de 8,20, turbidez de 115 NTU, Condutividade elétrica $1,22 \text{ mS m}^{-1}$, cor

aparente de 1510 mg PtCo L⁻¹, sólidos totais de 1660 mg L⁻¹ e DQO de 735,9 mg O₂ L⁻¹. Os resultados demonstraram que a aplicação da *Moringa oleifera* provocou inicialmente aumento da turbidez e da cor aparente, comportamento atribuído à liberação de matéria orgânica proveniente do coagulante. Entretanto, ao longo do tempo de tratamento, observou-se aumento progressivo da eficiência, atingindo, no último período avaliado, 58% de remoção da cor aparente e 33% de remoção da turbidez, enquanto o sulfato de alumínio apresentou remoções de 16% e 5,5%, respectivamente. A *Moringa* também apresentou o melhor desempenho na remoção de DQO, alcançando 20% de redução, em comparação a 8% para o sulfato de alumínio e 6% para o tanino. Entretanto, para os sólidos totais, o uso da *Moringa* não apresentou eficiência de remoção, sendo observado aumento desse parâmetro após o tratamento. Os autores concluíram que, entre os coagulantes avaliados, o extrato de *Moringa oleifera* apresentou os resultados mais promissores, embora sua aplicação tenha provocado inicialmente aumento da turbidez e da matéria orgânica no efluente.

Michelan *et al.* (2020) compararam o uso de *Moringa oleifera* com e sem casca como coagulante no tratamento convencional de água, utilizando dosagens de 100, 200, 300 e 400 mg L⁻¹. Os resultados demonstraram que a concentração de 300 mg L⁻¹ apresentou a melhor eficiência de remoção de turbidez e cor aparente, sendo considerada a dosagem ótima para ambas as formas de preparo. Para a turbidez, foram obtidas eficiências médias de 90,90% para a moringa sem casca e 92,66% para a moringa com casca, considerando o tratamento com 30 minutos de decantação. Em relação à cor aparente, as eficiências médias alcançaram 87,42% para a moringa sem casca e 90,61% para a moringa com casca nas mesmas condições. Embora a moringa com casca tenha apresentado, em geral, maiores percentuais de remoção, os autores verificaram que as diferenças entre as condições com e sem casca não foram estatisticamente significativas. Além disso, o tratamento promoveu pouca alteração no pH da água, que permaneceu próximo aos valores observados na água bruta, indicando que o uso do coagulante natural não provocou alterações significativas nesse parâmetro. Os autores também analisaram o lodo gerado e identificaram a presença de proteínas e lipídios, sem detecção de amido. O ensaio de fitotoxicidade com *Lactuca sativa* indicou que o lodo não apresentou toxicidade, uma vez que as diferentes concentrações avaliadas não inibiram a germinação e ainda favoreceram o crescimento das raízes. Dessa forma, o estudo evidenciou o potencial da *M. oleifera* como coagulante natural, associando uma elevada remoção de turbidez e cor à baixa alteração do pH e à geração de um lodo considerado atóxico.

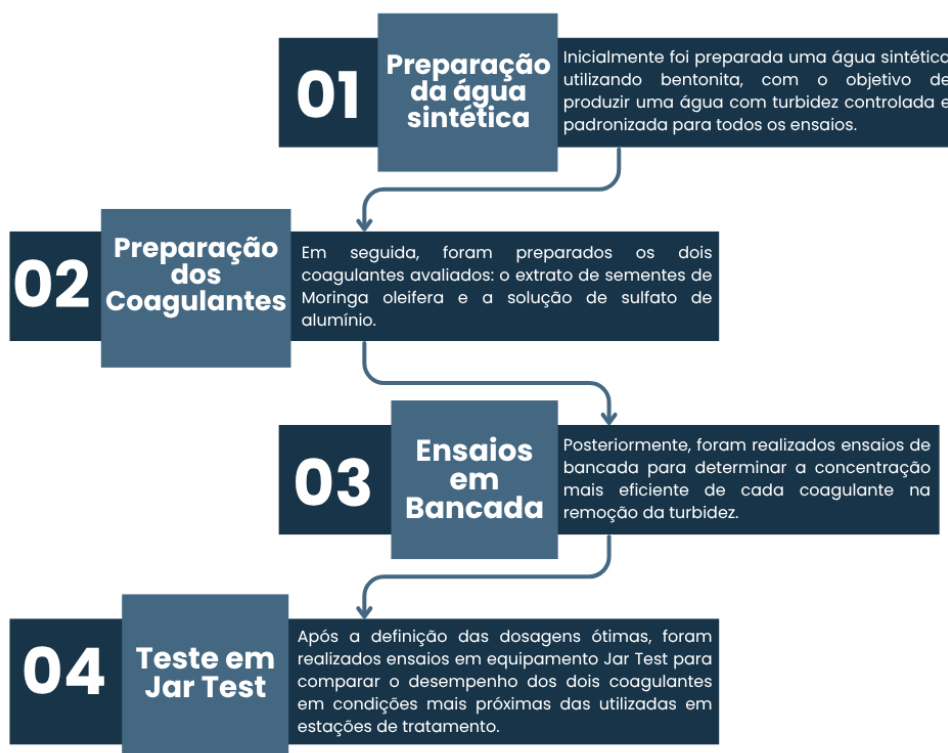
De modo geral, os estudos apresentados demonstram que a *Moringa oleifera* apresenta potencial para atuar como coagulante natural, promovendo reduções expressivas de turbidez e

cor em diferentes condições de tratamento. Entretanto, os resultados também evidenciam que sua eficiência é influenciada por fatores como dosagem, condições de mistura, tempo de decantação, forma de preparo e etapa de aplicação do coagulante.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental, comparativa e quantitativa, desenvolvida em escala laboratorial, com o objetivo de comparar a eficiência da *Moringa oleifera* com a de um coagulante convencional, especificamente o sulfato de alumínio, na remoção de turbidez de água. Todos os ensaios foram realizados sob condições controladas, buscando assegurar a confiabilidade, a repetibilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos. Para melhor compreensão da organização experimental adotada, as principais etapas que compõem os procedimentos metodológicos do estudo são apresentadas, de forma esquemática, na Figura 4.

Figura 4 - Síntese das etapas dos procedimentos metodológicos



Fonte: Autoria Própria

3.1 PREPARAÇÃO DA ÁGUA SINTÉTICA

Com o intuito de assegurar a uniformidade da turbidez inicial e minimizar a influência de variáveis não controladas, foi adotado um procedimento padronizado para o preparo da água com turbidez sintética, fundamentado na metodologia descrita por Arantes (2015).

Foram avaliadas duas fontes de água para a preparação da água sintética, sendo elas água destilada e água de torneira, com o objetivo de verificar sua adequação e possível influência na turbidez requerida.

A água sintética foi obtida a partir da dispersão de argila bentonita em água, empregando-se uma concentração de $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. A bentonita utilizada nos experimentos foi adquirida em estabelecimento comercial especializado em materiais minerais e produtos para uso industrial. A suspensão formada foi submetida à agitação em Jar Test (PoliControl Floc Control) por 30 minutos a 200 RPM, visando promover a completa homogeneização do material particulado.

Concluída a etapa de agitação, a mistura foi transferida para um recipiente adequado, onde permaneceu em repouso por um período de 24 horas, permitindo a estabilização da suspensão e a sedimentação das partículas mais densas.

A estabilidade da suspensão de bentonita foi avaliada por meio do monitoramento da turbidez ao longo do tempo, sem adição de coagulantes. As medições foram realizadas nos tempos de dez, vinte e trinta minutos, além de uma e vinte e quatro horas após o preparo da água sintética. Os resultados foram utilizados para análise da redução da turbidez e verificação da estabilidade da suspensão.

Após análise, a água que apresentou maior estabilidade de turbidez e melhor adequação às condições experimentais propostas foi selecionada para o estudo, sendo o sobrenadante obtido utilizado nos ensaios experimentais subsequentes.

3.2 PREPARAÇÃO DOS COAGULANTES

3.2.1 Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio foi utilizado como coagulante convencional nos ensaios de coagulação/floculação, sendo esse cedido pelo Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Campus Macau e empregado no preparo das soluções coagulantes utilizadas ao longo do estudo.

Com o intuito de preparar uma solução-estoque na concentração de 0,1% (m/v), correspondente a 1 mg/mL , utilizando água destilada como solvente, foram pesados 100 mg de sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (14-18)\text{H}_2\text{O}]$ em balança analítica (Marte AY220). Em seguida, o reagente foi transferido para um béquer de 250 mL, no qual foi dissolvido em volume parcial de água destilada sob agitação em agitador magnético (SOLAB SL-90/D 220V) por aproximadamente 3 minutos, até completa solubilização.

Após a dissolução, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL, realizando a lavagem do béquer com pequenas porções de água destilada para garantir a completa transferência do soluto. O volume foi então completado até o menisco com água

destilada, a solução foi homogeneizada por inversões sucessivas, obtendo-se a solução-estoque de sulfato de alumínio.

3.2.2 *Moringa oleifera*

As sementes de *Moringa oleifera* utilizadas na preparação do coagulante natural também foram cedidas pelo campus, sendo coletadas em exemplares da espécie presentes no terreno da instituição. Elas foram submetidas à retirada manual das vargens e cascas. Em seguida, seguindo os procedimentos descritos por Arantes (2014) e Silva (2012), as sementes descascadas passaram por processo de secagem em estufa, a temperatura de 65° C, por um período de 24 horas. Após esse período, foram acondicionadas e armazenadas em sacos plásticos transparentes, devidamente identificados, até o momento da utilização.

Antes da preparação do coagulante, as sementes foram submetidas a uma etapa de fragmentação, realizada manualmente com o auxílio de um pilão, até a obtenção de um material fino e homogêneo. Em seguida, o material obtido foi peneirado em peneira de 32 mesh, de modo a uniformizar a granulometria.

Essas etapas tiveram como objetivo o aumento da área superficial do material, favorecendo a liberação, extração e dispersão dos compostos ativos responsáveis pela ação coagulante.

Para a preparação da solução coagulante foi utilizada a proporção de 0,5% (m/v). Para isso, 0,5 g do pó de moringa foram pesados em balança analítica e transferidos para um béquer de 250 mL, e diluído em água destilada, sendo em seguida, submetidos à agitação magnética por 3 minutos.

A suspensão foi então transferida para um balão volumétrico de 100ml, realizando-se a lavagem do béquer com pequenas porções de água destilada para garantir a completa transferência do coagulante. O volume foi então completado até o menisco com água destilada, e a suspensão foi homogeneizada por inversões sucessivas.

3.3 TESTES INICIAIS PARA DOSAGEM ÓTIMA – *PRE-SCREENING*

Os testes iniciais de dosagem dos coagulantes foram realizados em bancada utilizando béqueres de 250 mL contendo 200 mL de água sintética e agitadores magnéticos (SOLAB SL-90/D 220V), em vez da utilização direta do equipamento de *Jar Test*. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de realizar uma avaliação preliminar das faixas de dosagem mais promissoras de cada coagulante, permitindo a identificação de intervalos de concentração capazes de promover redução significativa da turbidez.

A realização desses ensaios em menor escala possibilita maior agilidade experimental, menor consumo de reagentes e maior número de repetições em um curto período. Além disso, essa etapa preliminar permite ajustar as condições de dosagem antes da realização dos ensaios em jar test, que demandam maior volume de água e maior quantidade de coagulante.

Dessa forma, os ensaios em bancada funcionam como uma etapa exploratória do estudo, auxiliando na seleção das concentrações mais adequadas para os testes posteriores em jar test, nos quais as condições de coagulação, floculação e sedimentação podem ser reproduzidas de maneira mais controlada e próxima das condições operacionais utilizadas em processos de tratamento de água.

Após a adição do coagulante, as amostras foram submetidas a uma etapa de mistura rápida durante 60 segundos, utilizando-se ajuste de rotação correspondente ao valor 50 no mostrador do agitador magnético. Em seguida, foi realizada a etapa de mistura lenta por 20 minutos, com ajuste de rotação correspondente ao valor 15. Após a etapa de floculação, os sistemas permaneceram em repouso para a decantação dos flocos formados.

No primeiro conjunto de ensaios, as análises de turbidez e pH foram realizadas após 1, 2, 3 e 24 horas de decantação, com o objetivo de avaliar a influência do tempo de sedimentação na eficiência do tratamento. A partir do segundo conjunto de ensaios, as medições passaram a ser realizadas exclusivamente após 3 horas de decantação, tempo adotado como padrão para os experimentos subsequentes.

3.3.1 Sulfato de alumínio

A faixa inicial de dosagem do sulfato de alumínio foi estabelecida entre 17 e 27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, tomando como referência o Manual FlocControl (POLICONTROL, 2013), especificamente os valores mínimos e médios recomendados para a faixa de turbidez estudada, presentes na tabela “Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)”. O incremento de dosagem (razão) entre ensaios consecutivos foi definido pela Equação 1, que considera a amplitude da faixa de concentração adotada e o número de jarros disponíveis. Além disso, um béquer controle (branco), sem adição de coagulante, foi utilizado como referência para comparação da remoção de turbidez promovida pelo sulfato de alumínio.

Equação 1 - Determinação do incremento entre dosagens

$$\text{Razão de coagulante} = \frac{(\text{Maior concentração} - \text{Menor concentração})}{(n^{\circ} \text{ jarros} - 1)}$$

Para facilitar a padronização das dosagens aplicadas nos ensaios em bancada, foi elaborada uma tabela (Tabela 1) de conversão entre as concentrações expressas em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, a massa correspondente para o volume de 200 mL utilizado nos béqueres e o volume da solução estoque necessário para atingir cada dosagem, considerando solução-estoque de 0,1% (1 mg/mL).

Tabela 1 - Relação entre a dosagem SA aplicada

Dosagem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Massa para 200 mL (mg)	Volume da solução-estoque para 200 mL (mL)
0 (Controle)	0,0	0,0
17,0	3,4	3,4
19,5	3,9	3,9
22,0	4,4	4,4
24,5	4,9	4,9
27,0	5,4	5,4

Fonte: Autoria Própria

Logo após observou-se a necessidade de ampliar a faixa de concentração do coagulante. Dessa forma, foram realizados ensaios adicionais com quatro novas concentrações do coagulante, mantendo-se as condições experimentais adotadas nos testes iniciais e o mesmo incremento utilizado na progressão das concentrações. As novas dosagens avaliadas estenderam-se até o valor máximo sugerido pelo Manual FlocControl para a faixa de turbidez analisada. As novas concentrações avaliadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Faixa Ampliada de dosagem do SA

Dosagem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Massa para 200 mL (mg)	Volume da solução-estoque para 200 mL (mL)
29,5	5,9	5,9
32,0	6,4	6,4
34,5	6,9	6,9
37	7,4	7,4

Fonte: Autoria Própria

3.3.2 *Moringa oleifera*

Os ensaios preliminares com a MO foram conduzidos seguindo as mesmas condições experimentais adotadas nos testes anteriores, tendo como objetivo avaliar a eficiência da *Moringa oleifera* na remoção de turbidez da água sintética e determinar a faixa de dosagem mais adequada para os ensaios subsequentes.

Inicialmente, foi avaliada a dosagem de 32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, definida com base na dosagem ótima previamente obtida para o coagulante convencional Sulfato de alumínio, com o objetivo de realizar uma comparação preliminar entre os dois coagulantes em concentrações iguais.

Considerando que diversos estudos reportam valores de dosagem ótima para *Moringa oleifera* significativamente superior aos utilizados para coagulantes químicos, foram realizados ensaios adicionais com uma faixa ampliada de concentrações. Dessa forma, foram avaliadas dosagens adicionais variando de 50 a 500 mg·L⁻¹, com incrementos de 50 mg·L⁻¹ (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 e 500 mg·L⁻¹), ajustadas proporcionalmente para o volume de 200 mL utilizado nos béqueres. Na Tabela 3, são apresentadas as dosagens de *Moringa oleifera* avaliadas e as respectivas quantidades aplicadas nos béqueres.

Tabela 3 - Relação entre a dosagem de MO aplicada

Dosagem (mg·L ⁻¹)	Massa para 200 mL (mg)	Volume da solução-estoque para 200 mL (mL)
32,0	6,4	1,3
50,0	10,0	2,0
100,0	20,0	4,0
150,0	30,0	6,0
200,0	40,0	8,0
250,0	50,0	10,0
300,0	60,0	12,0
350,0	70,0	14,0
400,0	80,0	16,0
450,0	90,0	18,0
500,0	100,0	20,0

Fonte: Autoria Própria

Após a adição da solução coagulante, os sistemas foram submetidos às etapas de mistura rápida, mistura lenta e posterior decantação, sendo realizadas as medições de turbidez e pH da água tratada.

Essa etapa foi seguida por um novo teste com dosagens entre 350 e 420 mg·L⁻¹, com incrementos de 10 mg·L⁻¹ (350, 360, 370, 380, 390, 400, 410 e 420 mg·L⁻¹) ajustadas proporcionalmente para o volume de 200 mL utilizado nos béqueres e seguindo as mesmas etapas dos testes anteriores. As dosagens avaliadas nessa etapa e as respectivas quantidades de MO aplicadas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Faixa de refinamento da dosagem de MO

Dosagem (mg·L ⁻¹)	Massa para 200 mL (mg)	Volume da solução-estoque para 200 mL (mL)
360,0	72,0	14,4
370,0	74,0	14,8
380,0	76,0	15,2
390,0	78,0	15,6
400,0	80,0	16,0
410,0	82,0	16,4
420,0	84,0	16,8

Fonte: Autoria Própria

A partir dos resultados obtidos nessa etapa foi possível identificar a faixa de dosagem de maior eficiência, utilizada como base para a definição da dosagem considerada ótima nos experimentos subsequentes.

3.4 ENSAIO CONFIRMATÓRIO EM JAR TEST

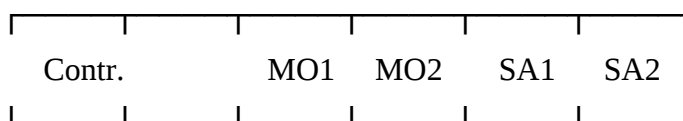
Após a definição das dosagens ótimas dos coagulantes em ensaios preliminares, foram realizados ensaios confirmatórios em equipamento Jar Test, com o objetivo de avaliar o desempenho dos coagulantes em condições experimentais mais representativas dos processos convencionais de coagulação/floculação aplicados ao tratamento de água.

Os ensaios foram conduzidos utilizando cinco jarros contendo 1 L de água sintética cada. A água utilizada apresentou turbidez inicial média de aproximadamente 125 NTU e pH inicial de 7,2.

Foram avaliadas as dosagens ótimas previamente determinadas para os coagulantes Sulfato de alumínio e *Moringa oleifera*, correspondentes a $32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente. Para isso, as soluções coagulantes foram preparadas em concentrações ajustadas de modo que a adição de 16 mL de solução em cada jarro correspondesse às dosagens desejadas.

A distribuição experimental foi composta por: 1 jarro controle (branco), sem adição de coagulante, 2 jarros contendo a suspensão de moringa e 2 jarros contendo solução de sulfato de alumínio. A distribuição dos jarros utilizados no ensaio é apresentada na Figura 5, destacando a disposição do controle e dos tratamentos com *Moringa oleifera* e sulfato de alumínio.

Figura 5 - Esquema dos jarros no FlocControl



Fonte: Autoria Própria

Inicialmente, aplicou-se mistura rápida durante 60 segundos a 300 rpm, visando promover a dispersão homogênea do coagulante e a desestabilização das partículas suspensas. Em seguida, realizou-se mistura lenta durante 20 minutos a 50 rpm, favorecendo a formação e crescimento dos flocos. Após a etapa de floculação, os sistemas permaneceram em repouso para decantação durante 3 horas.

Ao final do período de sedimentação, foram realizadas medições de turbidez e pH da água sobrenadante para avaliação da eficiência dos coagulantes na remoção de turbidez. Com

o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados, foram realizadas duas determinações de turbidez para cada jarro, utilizando amostras coletadas simultaneamente do sobrenadante após o período de decantação. Para o pH, foi considerado o valor obtido em uma única medição por jarro.

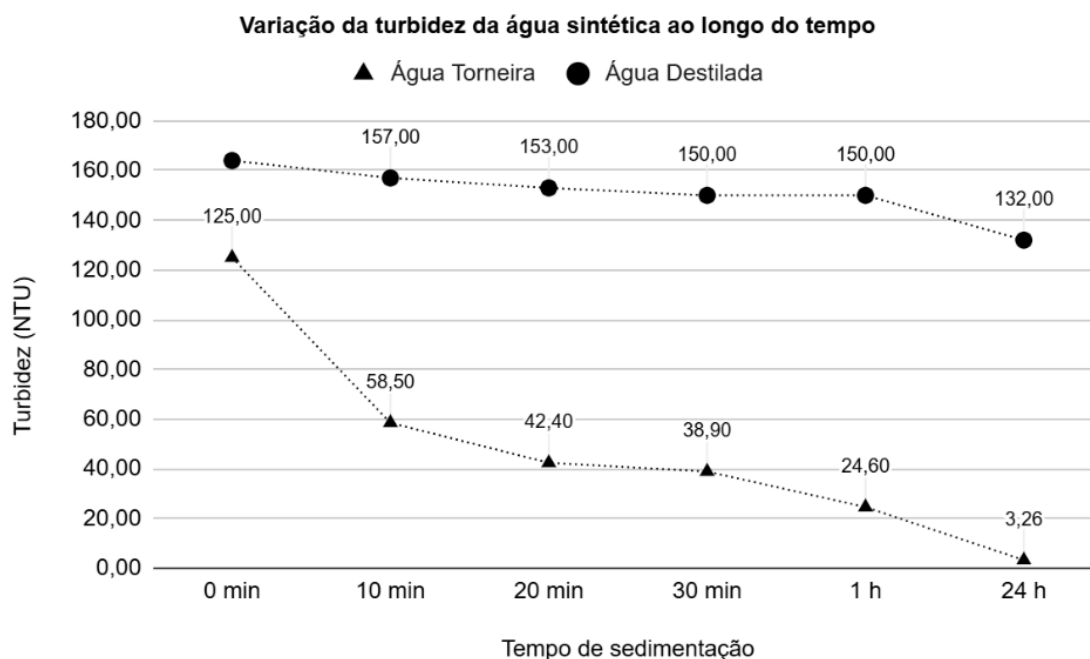
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DA ÁGUA SINTÉTICA

Com o objetivo de avaliar a estabilidade da suspensão de bentonita utilizada na preparação da água sintética, foram realizados ensaios preliminares, sem adição de coagulante, comparando o comportamento da turbidez ao longo do tempo em sistemas preparados com água da torneira e água destilada.

Os resultados demonstraram comportamento significativamente distinto entre os sistemas. Na água da torneira, observou-se rápida redução da turbidez ao longo do tempo, passando de 125 NTU para aproximadamente 3 NTU após 24 horas, correspondendo a uma redução maior que 97% da turbidez inicial. Esse comportamento indica a perda da estabilidade da suspensão de bentonita, favorecendo a sedimentação espontânea das partículas. A variação da turbidez observada nos dois sistemas ao longo do período de acompanhamento é apresentada no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Variação de turbidez ao longo do tempo



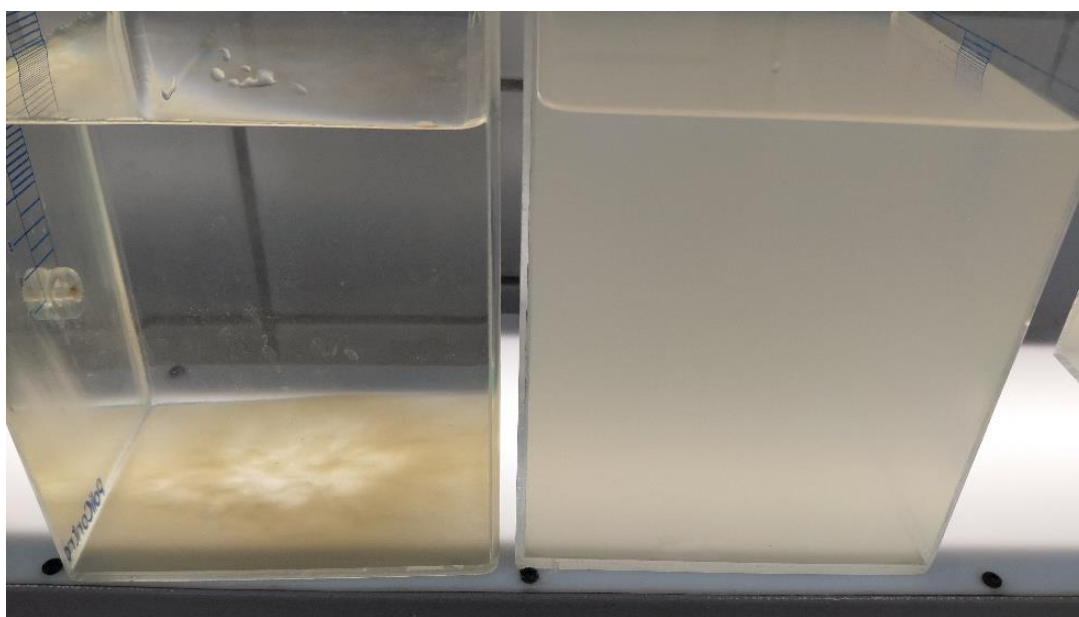
Fonte: Autoria Própria

A maior parte da sedimentação ocorreu ainda nos primeiros momentos do ensaio, sendo observada redução de aproximadamente 53,2% da turbidez já nos primeiros 10 minutos e cerca de 80,3% após 1 hora de repouso, indicando elevada instabilidade da suspensão de bentonita quando preparada utilizando água da torneira.

Esse comportamento pode ser explicado pela presença de sais dissolvidos, como cálcio e magnésio, que aumentam a força iônica do meio e promovem a compressão da dupla camada elétrica das partículas coloidais, favorecendo sua agregação e sedimentação. A pesquisa de Roussy *et al.* (2005) vai de encontro com essa análise, nesse estudo é relatado uma maior eficiência de sedimentação da suspensão de bentonita em água da torneira, atribuída justamente pelos sais presentes na água. Nesse estudo, a turbidez da suspensão diminuiu de aproximadamente 200 NTU para menos de 50 NTU após 60 minutos de decantação sem ajuda de um coagulante.

Por outro lado, os ensaios realizados com água destilada apresentaram comportamento significativamente mais estável. A turbidez inicial de aproximadamente 164 NTU reduziu para 132 NTU após 24 horas, correspondendo a uma redução de apenas 19,5%. A diferença visual entre as condições das suspensões após o período de 24 horas pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Comparação visual entre as águas sintéticas



Fonte: Autoria Própria

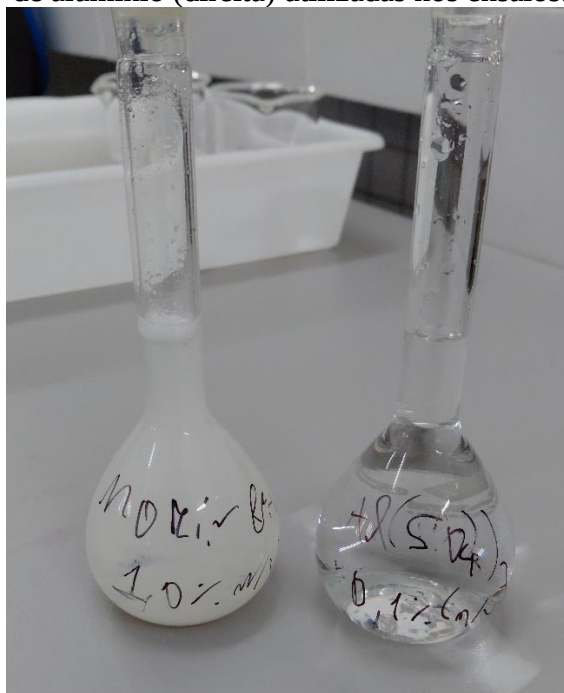
Dessa forma, optou-se pela utilização de água destilada na preparação da água sintética utilizada nos ensaios subsequentes, uma vez que sua maior estabilidade permitiu melhor controle experimental e menor interferência da sedimentação natural.

4.2 COAGULANTES

A solução-estoque de sulfato de alumínio apresentou completa solubilização em água destilada, formando uma solução homogênea e visualmente estável, sem formação de partículas sedimentáveis ao longo dos ensaios.

A preparação da suspensão coagulante de *Moringa oleifera* apresentou características distintas em relação ao Sulfato de alumínio. Mesmo após o processo de trituração e peneiramento, observou-se a presença de partículas em suspensão e tendência à sedimentação do material ao longo do tempo, exigindo homogeneização frequente antes dos ensaios. As diferenças observadas entre as duas preparações podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7 - Aspecto visual da suspensão de *Moringa oleifera* (esquerda) e da solução de sulfato de alumínio (direita) utilizadas nos ensaios.



Fonte: Autoria Própria

A etapa de secagem das sementes contribuiu para redução da umidade do material e facilitou o processo de trituração, possibilitando a obtenção de um pó mais fino e homogêneo, favorecendo a dispersão da moringa em água destilada. O peneiramento do material também auxiliou na padronização granulométrica da suspensão, reduzindo parcialmente a presença de partículas maiores que poderiam interferir na coagulação e na sedimentação dos flocos. A sequência de etapas empregadas no preparo das sementes, desde a condição *in natura* até a obtenção do material peneirado, é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Etapas de preparação das sementes de *Moringa oleifera* para obtenção do coagulante: (a) sementes in natura; (b) sementes após secagem e descascamento; (c) sementes trituradas; e (d) sementes peneiradas.



Fonte: Autoria Própria

Durante os ensaios, verificou-se que a suspensão de moringa apresentou maior variabilidade experimental quando comparada ao sulfato de alumínio, especialmente em concentrações elevadas. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de matéria orgânica residual e partículas sólidas provenientes da própria moringa, capazes de influenciar a turbidez residual da água tratada.

4.3 TESTES INICIAIS PARA DOSAGEM ÓTIMA

4.3.1 Sulfato de Alumínio

Os ensaios preliminares com o coagulante Sulfato de alumínio foram conduzidos com dosagens entre 17 e 27 mg·L⁻¹, além de um béquer controle (branco), contendo apenas água sintética, sem adição de coagulante. O objetivo dessa etapa foi avaliar o comportamento inicial da turbidez e identificar uma faixa de dosagem potencialmente eficiente para os testes posteriores.

Durante os experimentos foram realizadas medições de pH e turbidez em diferentes tempos de decantação (1 h, 2 h, 3 h e 24 h), com o intuito de verificar a evolução da sedimentação dos flocos formados ao longo do tempo.

Os resultados obtidos para turbidez e pH encontram-se apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação entre a dosagem SA aplicada

Dosagem (mg/L)	pH	Turbidez 1h (NTU)	Turbidez 2h (NTU)	Turbidez 3h (NTU)	Turbidez 24h (NTU)
0 (Branco)	7,2	140,0	136,0	138,0	120,0
17,0	7,2	72,2	72,9	72,4	65,5
19,5	7,2	67,2	52,6	50,5	44,0
22,0	7,2	35,0	35,2	31,6	28,1
24,5	7,2	33,1	31,5	30,5	27,6
27,0	7,2	20,3	17,6	16,2	12,8

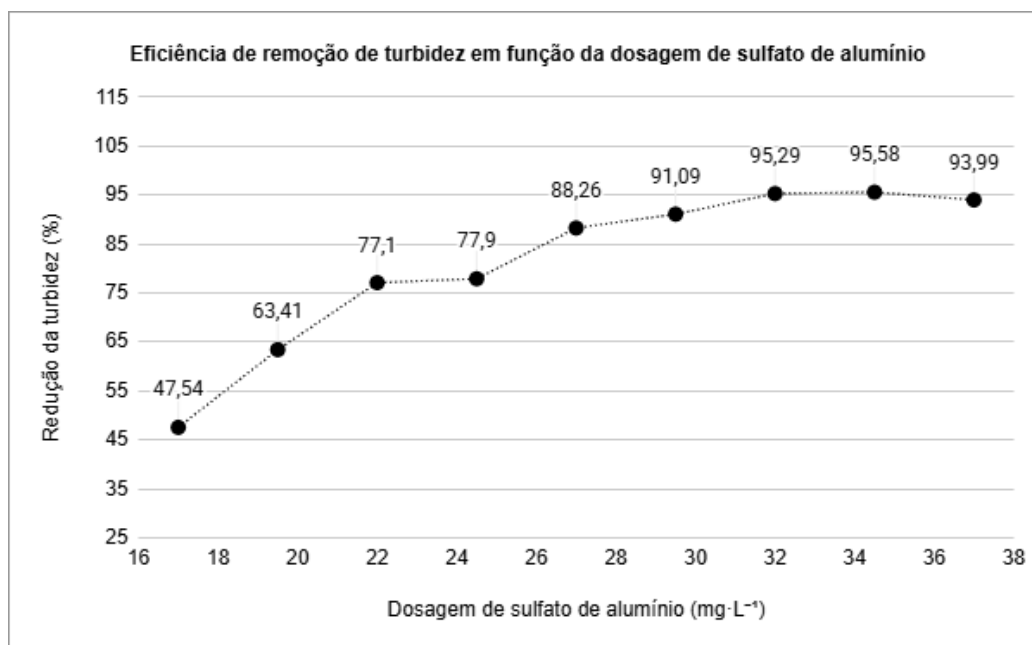
Fonte: Autoria Própria

A análise dos dados mostrou que a maior redução da turbidez ocorreu durante a primeira hora de decantação, sendo observadas apenas pequenas variações nos valores medidos após 2, 3 e 24 horas. Esse comportamento indica que a maior parte da sedimentação dos flocos ocorre no início do processo. Entretanto, optou-se por adotar o tempo de 3 horas como padrão de decantação nos experimentos subsequentes, por se tratar de uma condição mais segura e representativa.

Embora também tenham sido realizadas medições após 24 horas de decantação, observou-se que as variações adicionais de turbidez foram pouco significativas em relação aos valores obtidos após 3 horas, sendo essas reduções, em grande parte, associadas ao processo de sedimentação natural já observado na água sintética ao longo do tempo.

Além disso, observou-se que as dosagens inicialmente avaliadas não foram suficientes para reduzir a turbidez da água sintética aos níveis desejados para esse estudo. Mesmo nas maiores concentrações testadas dentro da faixa inicial, os valores de turbidez residual permaneceram acima do esperado, indicando que a quantidade de coagulante aplicada ainda era insuficiente para promover uma coagulação mais eficiente. Dessa forma, tornou-se necessário ampliar a faixa de concentração. O Gráfico 5 apresenta a eficiência de remoção de turbidez obtida nas dosagens avaliadas inicialmente e na faixa de concentração posteriormente ampliada, permitindo observar o comportamento do sulfato de alumínio com o aumento da dosagem aplicada.

Gráfico 2 - Eficiência de remoção de turbidez em função das dosagens de SA



Fonte: Autoria Própria

Observou-se aumento progressivo da eficiência de remoção de turbidez com o incremento da dosagem de sulfato de alumínio. A remoção máxima foi obtida na concentração de 34,5 mg·L⁻¹, com eficiência de 95,58%. Entretanto, a dosagem de 32 mg·L⁻¹ apresentou desempenho semelhante (95,29%), sendo adotada como concentração ótima por proporcionar elevada eficiência com menor consumo de coagulante.

Em concentrações superiores observou-se aumento da turbidez residual, como verificado na dosagem de 37 mg·L⁻¹, o que pode estar associado a fenômenos de sobredosagem do coagulante, capazes de provocar a reestabilização das partículas coloidais.

Os resultados obtidos apresentaram concordância com a faixa de dosagem recomendada pelo Manual FlocControl para águas com turbidez semelhante à utilizada neste estudo, uma vez que a concentração ótima determinada experimentalmente situou-se próxima aos valores máximos indicados pelo manual para essa condição.

Os resultados obtidos do pH indicam que o aumento da eficiência da remoção de turbidez observado nas maiores dosagens esteve acompanhado de uma redução moderada do pH, comportamento esperado para coagulantes à base de alumínio e amplamente relatado na literatura. A manutenção do pH em valores próximos da neutralidade demonstra que, nas condições experimentais adotadas, não houve necessidade de correção química adicional para a realização dos ensaios.

4.3.2 *Moringa oleifera*

Inicialmente, foram avaliadas diferentes concentrações do coagulante natural em ensaios preliminares em bancada, permitindo observar o comportamento da turbidez residual em função do aumento da dosagem aplicada. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de turbidez e pH obtidos nos ensaios com *Moringa oleifera*

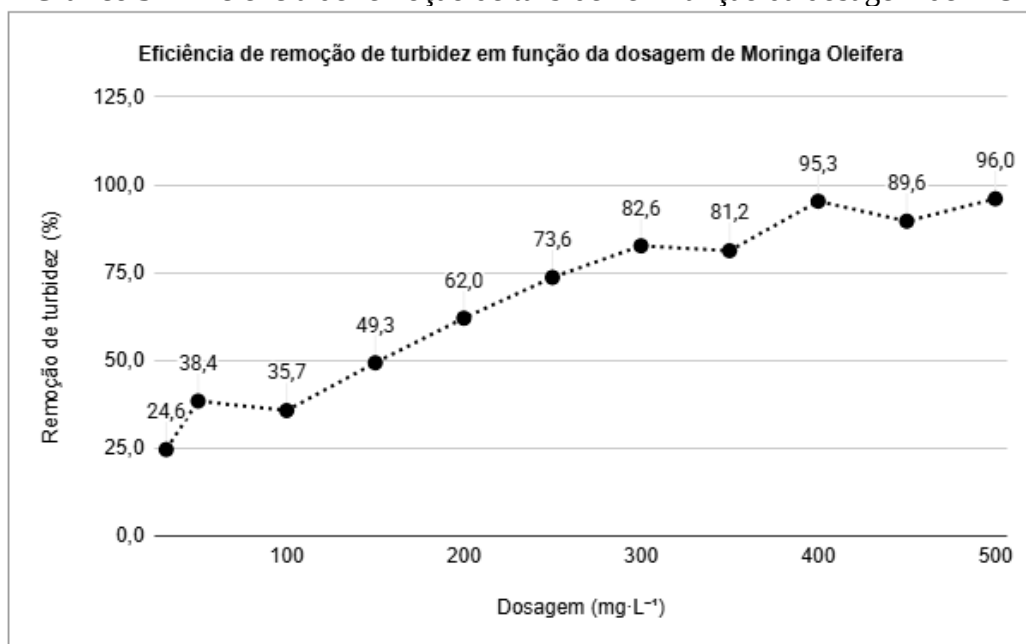
Dosagem (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Redução (%)
0 (Branco)	7,2	138,0	-
32,0	7,4	104,0	24,6
50,0	7,2	85,0	38,4
100,0	8,0	88,7	35,7
150,0	7,6	69,9	49,3
200,0	7,4	52,4	62,0
250,0	7,6	36,5	73,6
300,0	7,2	24,0	82,6
350,0	7,6	25,9	81,2
400,0	7,3	6,5	95,3
450,0	7,2	14,4	89,6
500,0	7,3	5,5	96,0

Fonte: Autoria Própria

A variação do pH ao longo dos ensaios foi pequena, mantendo-se próxima da neutralidade em todas as concentrações avaliadas. Essa baixa variação indica que a adição do coagulante natural *Moringa oleifera* não promoveu alterações significativas nas condições ácido-básicas do sistema, comportamento frequentemente observado em estudos que utilizam sementes de moringa como coagulante natural.

Em relação à remoção de turbidez, foi realizado um ensaio utilizando a concentração de 32 mg·L⁻¹ de MO, valor correspondente à dosagem ótima previamente determinada para o coagulante metálico. Entretanto, nessa condição foi observada turbidez residual de 104 NTU indicando baixa eficiência da moringa nessa faixa de concentração. Esse resultado demonstra que, diferentemente do sulfato de alumínio, a moringa necessita de concentrações significativamente mais elevadas para promover coagulação eficiente nas condições avaliadas neste estudo. O Gráfico 4 apresenta a eficiência de remoção de turbidez obtida nas diferentes dosagens de *Moringa* avaliadas.

Gráfico 3 - Eficiência de remoção de turbidez em função da dosagem de MO



Fonte: Autoria Própria

Com o aumento da dosagem do coagulante, observou-se redução progressiva da turbidez residual e aumento correspondente da eficiência de remoção, principalmente a partir de concentrações superiores a 200 mg·L⁻¹. A maior redução de turbidez foi observada na faixa entre 350 e 400 mg·L⁻¹, região na qual ocorre a formação mais eficiente de flocos e consequente sedimentação das partículas em suspensão. Nessa faixa, as eficiências de remoção atingiram valores próximos a 95%, demonstrando elevado potencial da Moringa para o tratamento de águas com elevada turbidez.

No ensaio realizado com 450 mg·L⁻¹, foi observado um aumento inesperado da turbidez residual. Como a solução apresenta partículas sólidas em suspensão, é possível que tenha ocorrido transferência excessiva de material particulado durante a pipetagem, especialmente devido ao acúmulo de partículas no fundo do recipiente ou sobredosagem. Dessa forma, parte da turbidez observada pode estar relacionada não apenas às partículas presentes na água sintética, mas também ao material orgânico proveniente da própria moringa. Ainda assim, os resultados indicam que, acima de 400 mg·L⁻¹, as reduções adicionais de turbidez tornam-se pouco expressivas.

Sendo assim, com o objetivo de avaliar de forma mais precisa a região de maior eficiência do coagulante, foi realizado um novo conjunto de ensaios com concentrações intermediárias situadas na faixa entre 360 e 420 mg·L⁻¹ (Tabela 7).

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de refinamento da faixa entre 360 e 420 mg·L⁻¹

Dosagem (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Redução (%)
360,0	7,3	20,5	85,1
370,0	7,5	14,8	89,3
380,0	7,4	11,1	92,0
390,0	7,2	8,6	93,8
400,0	7,3	6,6	95,2
410,0	7,3	30,5	77,9
420,0	7,3	21,8	84,2

Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos confirmaram que a eficiência de remoção de turbidez aumenta progressivamente até aproximadamente 400 mg·L⁻¹. Observou-se redução gradual da turbidez residual, passando de 20,5 NTU na concentração de 360 mg·L⁻¹ para 6,6 NTU em 400 mg·L⁻¹. Em termos de eficiência, a remoção aumentou de 85,1% para 95,2% nesse intervalo, evidenciando o aprimoramento contínuo do processo de coagulação e sedimentação à medida que a dosagem do coagulante foi elevada.

Entretanto, nas concentrações superiores a 400 mg·L⁻¹, os resultados voltaram a apresentar comportamento instável, sendo observados valores de turbidez residual de 30,5 NTU em 410 mg·L⁻¹ e 21,8 NTU em 420 mg·L⁻¹. Esse comportamento reforça a hipótese de ocorrência de sobredosagem e de possível interferência causada pela maior transferência de partículas orgânicas da própria suspensão de *moringa* em concentrações mais elevadas.

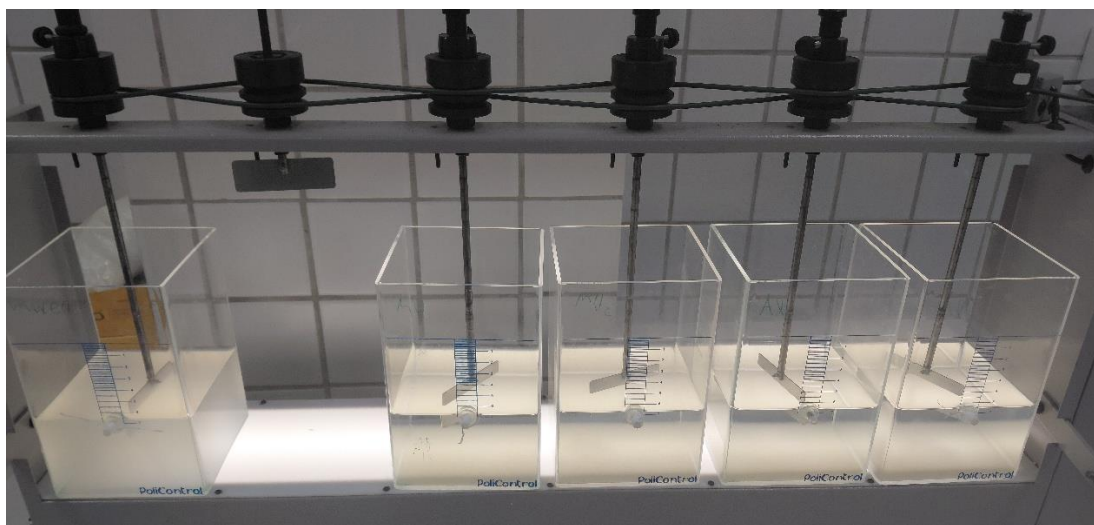
Dessa forma, a concentração de 400 mg·L⁻¹ foi considerada a dosagem ótima para o coagulante *Moringa oleifera* nas condições experimentais avaliadas, uma vez que apresentou a menor turbidez residual e elevada eficiência de remoção (95,2%). Além disso, concentrações superiores não promoveram melhorias relevantes no processo, resultando, inclusive, em redução da eficiência e aumento da turbidez residual.

4.4 ENSAIO CONFIRMATÓRIO EM JAR TEST

Após a definição das dosagens ótimas dos coagulantes nos ensaios preliminares, foram realizados ensaios confirmatórios em Jar Test com o objetivo de avaliar o desempenho do sulfato de alumínio e da *Moringa oleifera* em condições mais próximas às empregadas em processos convencionais de tratamento de água.

A água sintética utilizada apresentou turbidez inicial de aproximadamente 125 NTU e pH de 7,2. Após as etapas de coagulação, floculação e decantação, foram realizadas as análises de turbidez e pH do sobrenadante obtido em cada jarro. A disposição dos jarros durante a realização do ensaio confirmatório pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 - Ensaio confirmatório em Jar Test para avaliação dos coagulantes estudados.



Fonte: Autoria Própria

Os valores de turbidez e pH obtidos após o tratamento, bem como as respectivas condições experimentais, são apresentados na Tabela 8.

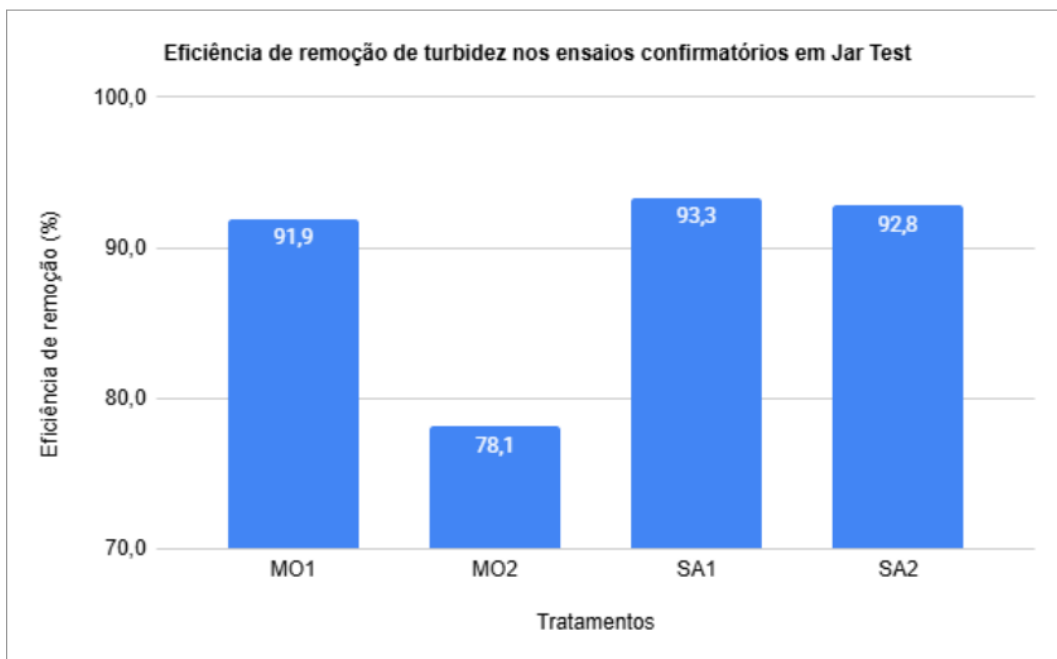
Tabela 8 - Resultados dos ensaios confirmatórios em Jar Test

Tratamento	Turbidez 1 (NTU)	Turbidez 2 (NTU)	Turbidez média (NTU)	pH
Branco	124,0	128,0	126,0	7,2
MO1	10,1	10,2	10,2	7,4
MO2	28,3	27,0	27,7	7,4
SA1	8,2	8,7	8,4	7,2
SA2	8,8	9,4	9,1	7,1

Fonte: Autoria Própria

Para uma melhor comparação entre os tratamentos, também foi calculada a eficiência de remoção de turbidez utilizando a turbidez inicial média da água sintética como referência. No Gráfico 4, são apresentados esses valores para cada tratamento avaliado.

Gráfico 4 - Eficiência de remoção obtidas em Jar Test



Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos demonstram que tanto o sulfato de alumínio quanto a *Moringa oleifera* foram capazes de promover elevada remoção de turbidez da água sintética, reduzindo valores iniciais próximos de 125 NTU para valores inferiores a 30 NTU em todos os tratamentos avaliados.

Os tratamentos com sulfato de alumínio apresentaram os melhores resultados e elevada repetibilidade entre as duplicatas. A turbidez residual médias de 8,4 NTU e 9,1 NTU corresponderam a eficiências de remoção de 93,3% e 92,8%, respectivamente. A pequena diferença observada entre SA1 e SA2 demonstra boa estabilidade do processo e confirma a adequação da dosagem ótima de $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ definida nos ensaios preliminares.

Para a *Moringa oleifera*, o tratamento MO1 apresentou turbidez residual média de 10,2 NTU e eficiência de remoção de 91,9%, resultado bastante próximo ao obtido para o sulfato de alumínio. Esse desempenho evidencia o potencial da moringa como coagulante natural para aplicação em processos de tratamento de água.

Entretanto, observou-se maior variabilidade entre as duplicatas da moringa. Enquanto MO1 apresentou elevada eficiência de remoção, o tratamento MO2 resultou em turbidez residual média de 27,7 NTU e eficiência de 78,1%. Essa diferença pode estar associada à natureza heterogênea da suspensão de *Moringa oleifera*, uma vez que a presença de partículas orgânicas em suspensão pode influenciar diretamente a quantidade de compostos ativos adicionada a cada jarro. Além disso, pequenas variações na homogeneização da suspensão, na

transferência do volume pipetado ou na formação dos flocos podem impactar significativamente os resultados experimentais.

Em relação ao pH, verificou-se baixa influência dos coagulantes sobre a água tratada. Os valores finais permaneceram próximos ao pH inicial de 7,2, variando entre 7,1 e 7,4. Esse comportamento demonstra que, nas condições avaliadas, tanto o sulfato de alumínio quanto a *Moringa oleífera* apresentaram reduzido impacto sobre as características ácido-base do meio.

De modo geral, os resultados indicam que a *Moringa oleífera* apresenta um grande potencial para utilização como coagulante natural no tratamento de águas com elevada turbidez, alcançando eficiências de remoção próximas às obtidas pelo sulfato de alumínio. Contudo, a maior variabilidade observada entre as repetições evidencia a necessidade de aperfeiçoamento dos procedimentos de preparo e aplicação da suspensão, visando aumentar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de coagulantes naturais tem sido cada vez mais estudada como alternativa aos coagulantes químicos convencionais empregados no tratamento de água. Nesse contexto, a *Moringa oleifera* destaca-se pela presença de proteínas catiônicas capazes de promover a desestabilização de partículas suspensas e, conseqüentemente, a redução da turbidez da água. Além de sua eficiência potencial, a espécie apresenta vantagens relacionadas à sua origem natural, disponibilidade em regiões tropicais e possibilidade de cultivo local, características que reforçam seu interesse para aplicações em tratamento de água.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da *Moringa oleifera* na remoção de turbidez em água sintética, determinar sua faixa ótima de dosagem e comparar seu desempenho com o de um coagulante convencional utilizado como referência. Os resultados obtidos permitiram atingir os objetivos propostos, demonstrando que a moringa foi capaz de promover elevadas remoções de turbidez, alcançando resultados próximos aos obtidos com o sulfato de alumínio nas condições experimentais determinadas.

Outro aspecto de destaque deste estudo foi a utilização dos ensaios preliminares em bancada como etapa de triagem das dosagens dos coagulantes. A metodologia empregada, baseada no uso de béqueres e agitadores magnéticos, permitiu avaliar diversas concentrações de forma rápida e eficiente, reduzindo significativamente o consumo de reagentes, o volume de água utilizado e o tempo necessário para a execução dos experimentos. Além disso, as concentrações selecionadas nessa etapa apresentaram resultados compatíveis com aqueles obtidos posteriormente nos ensaios confirmatórios em Jar Test, demonstrando a confiabilidade da abordagem adotada. Dessa forma, os ensaios em bancada mostraram-se uma alternativa prática e economicamente viável para a definição preliminar de dosagens em estudos de coagulação e floculação.

Os resultados também evidenciaram algumas particularidades associadas ao uso da *Moringa oleifera*. Diferentemente dos coagulantes químicos convencionais, sua preparação demanda diversas etapas, incluindo coleta, retirada das vagens e cascas, secagem, trituração, peneiramento e preparo da suspensão. Esse processo exige maior tempo de preparação e controle experimental, além de gerar uma quantidade significativa de material não aproveitado diretamente como coagulante. Porém, embora representem resíduos do processo, esses subprodutos podem apresentar potencial para aplicações futuras, como produção de compostagem, fertilizantes orgânicos, biomassa energética ou outros usos agrícolas, contribuindo para o aproveitamento integral da planta e para o aumento da sustentabilidade do processo.

Outra dificuldade encontrada foi a manutenção da homogeneidade da suspensão de moringa. Por se tratar de um material natural constituído por partículas sólidas dispersas em água, pequenas variações na homogeneização, na transferência da suspensão ou na concentração de partículas presentes podem influenciar diretamente os resultados obtidos. Essa característica também dificulta a definição de uma dosagem universal para aplicação da moringa, uma vez que seu desempenho pode variar em função da qualidade das sementes, das condições de preparo da suspensão e das características da água tratada.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a utilização de água sintética como matriz experimental, condição que permite maior controle das variáveis, mas que não reproduz integralmente a complexidade encontrada em águas naturais. Além disso, a avaliação concentrou-se principalmente nos parâmetros de turbidez e pH, não abrangendo outros aspectos importantes da qualidade da água, como cor, matéria orgânica dissolvida, alcalinidade, condutividade elétrica e parâmetros microbiológicos.

Os resultados obtidos abrem perspectivas para novas pesquisas envolvendo a *Moringa oleifera*. Estudos futuros podem avaliar seu desempenho em águas naturais com diferentes características físico-químicas, investigar métodos alternativos de preparo e conservação da suspensão coagulante, analisar a estabilidade do material ao longo do tempo e buscar formas de aumentar a reprodutibilidade dos resultados. Também se mostram relevantes pesquisas voltadas para o aproveitamento dos resíduos gerados durante o processamento das sementes e para a combinação da moringa com outros processos de tratamento de água.

Dessa forma, conclui-se que as sementes de *Moringa oleifera* apresenta elevado potencial para utilização como coagulante natural na remoção de turbidez de águas, constituindo uma alternativa promissora para aplicações em tratamento de água. Embora ainda existam desafios relacionados à padronização do preparo, à estabilidade da suspensão e à definição de dosagens mais consistentes, os resultados obtidos demonstram que a espécie possui características que justificam a continuidade das pesquisas e o aprofundamento dos estudos voltados à sua aplicação prática.

REFERÊNCIAS

ADDICH, Mourad; *et al.* **Elaboration of innovative ceramic microfiltration membrane from natural Moroccan sand for wastewater treatment.** *Desalination and Water Treatment*, v.260, p.299-308, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S194439862402650X>. Acesso em: 5 Jan. 2026.

ADDICH, Mourad; *et al.* **Optimization of coagulation-flocculation in urban water treatment using Moringa oleifera.** *Desalination and Water Treatment*, v.320, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624161164>. Acesso em: 5 Jan. 2026.

ALI, Eman N.; *et all.* **Production of Natural Coagulant from Moringa Oleifera Seed for Application in Treatment of Low Turbidity Water.** *Journal of Water Resource and Protection*, v.2, n.3, 2010. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=1498>. Acesso em: 26 Fev. 2026

ANDRADE, Guilherme C. **EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE FLOTAÇÃO E FILTRAÇÃO COM USO DE COAGULANTE NATURAL E QUÍMICO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIO.** Tese (Bacharel em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12024/3/LD_COEAM_2015_1_07.pdf. Acesso em: 01 Mar. 2026

ARANTES, Camila C.; *et al.* **USO DE COAGULANTES NATURAIS À BASE DE MORINGA OLEIFERA E TANINO COMO AUXILIARES DA FILTRAÇÃO EM GEOTÊXTIL SINTÉTICO NÃO TECIDO.** *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.34, n.4, p.780-788, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000400017>. Acesso em: 18 Nov. 2025.

ARANTES, Camila C.; *et al.* **Diferentes formas de aplicação da semente de Moringa oleifera no tratamento de água.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, n.3, p.266–272, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p266-272>. Acesso em: 18 Nov. 2025.

CARDOSO, Karina C.; *et al.* **Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da Moringa oleifera Lam.** Acta Scientiarum Technology, Maringá, v. 30, n. 2, p. 193-198, 2008. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/view/5493/5493>. Acesso em: 26 Fev. 2026.

FRANCO, Monalisa. **USO DE COAGULANTE EXTRAÍDO DE SEMENTES DE Moringa oleifera COMO AUXILIAR NO TRATAMENTO DE ÁGUA POR FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/777922>. Acesso em: 01 Mar. 2026.

FILIPENCO, Daniil. **Water pollution in the world: major causes and statistics.** DevelopmentAid, 2025. Disponível em: <https://www.developmentaid.org/news-stream/post/152754/water-pollution-in-the-world>. Acesso em: 25 Fev. 2026

GOMES, Irene; BRITTO, Vinícius. **Em 2023, um em cada três domicílios rurais era abastecido por rede geral de água.** AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/42292-em-2023-um-em-cada-tres-domicilios-rurais-era-abastecido-por-rede-geral-de-agua>. Acesso em: 25 Fev. 2026

GUILHERME. **FLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DE AGUA.** MIXTURA EQUIPAMENTOS HIDRÁULICOS LTDA. Disponível em: <https://mixtura.ind.br/floculacao-no-tratamento-de-agua/>. Acesso em 7 de julho de 2026

JANZ, Fellipe J. L.; *et al.* **Comparação entre coagulantes orgânicos e sulfato de alumínio no pós tratamento do efluente de indústria cervejeira.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 25857-25864, mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-150>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

KAKKAR, Shama; DHARAVAT, Nagaraju; PAMMI, S.V.N.. **A Moringa oleifera, a natural coagulant, as a potential future approach for sustainable water purification: a patent**

based study. Results in Engineering, v. 27, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025026970>. Acesso em: 5 Jan. 2026.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** Editora Átomo, Campinas, São Paulo, 3ª ed., 2010.

MED-HEALTH.NET. **Moringa Oleifera.** 2013. Disponível em: <https://www.med-health.net/Moringa-Oleifera.html>. Acesso em: 15/05/2026

MICHELAN, Denise C. G. S.; *et al.* **Uso do coagulante/floculante emergente à base de moringa no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido: tratamento de água com moringa e toxicidade do lodo.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, v.26, n.5, p.955-963, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200314>. Acesso em: 7 Jan. 2026

POLICONTROL INSTRUMENTOS DE CONTROLE AMBIENTAL IND. E COM. LTDA. **Manual FlocControl.** Rev. 14. Diadema, SP: PoliControl, 2013.

RITCHIE, Hannah; SPOONER, Fiona; ROSER, Max. **Clean Water.** Our World in Data, 2019. Disponível: <https://ourworldindata.org/clean-water>. Acesso em: 7 Jan. 2026

ROUSSY, Jean; *et al.* **Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions.** Water Research, v.39, n.14, p.3247-3258, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.039>. Acesso em: 14 Fev. 2026.

SANTOS, Rafael L. **USO DA MORINGA OLEÍFERA COMO COAGULANTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA: REVISÃO DA LITERATURA.** Tese (Bacharel em Ciência e Tecnologia), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Pau dos Ferros, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8568>. Acesso em: 01 Mar. 2026.

SILVA, Fernando J. A.; MATOS, J. E. X.. **Sobre dispersões de moringa oleifera para tratamento de água**. Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 29, n. 2, p.157-163, dez. 2008. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/30/4487>. Acesso em: 7 Jan. 2026

SILVA, Gabriela K.. **MÉTODO ALTERNATIVO PARA APLICAÇÃO DO COAGULANTE NATURAL Moringa oleifera NO TRATAMENTO DE ÁGUA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade De Engenharia Civil, Arquitetura E Urbanismo, Universidade de Campinas. Campinas, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/850298>. Acesso em: 20 Nov. 2025.

WWF - WORLDWILDLIFE. **Water Scarcity**. 2024. Disponível em: <https://www.worldwildlife.org/our-work/freshwater/water-scarcity/>. Acesso em: 25 Fev. 2026