

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA SEMENTE DE *CARICA PAPAYA* LAM NA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA EM MACAPÁ (AP)

André Bacelar Rodrigues ¹

Michelle Silva Santos ²

Vanessa Nunes Alves ³

Resumo: A crescente degradação dos corpos hídricos e a ampliação da demanda por água potável tornam o tratamento de água uma prioridade ambiental e social, especialmente em regiões dependentes de águas superficiais. Nesse contexto, este presente estudo avaliou a eficiência das sementes de *Carica papaya* como biocoagulante no tratamento de água superficial coletada no rio Amazonas, em Macapá (AP). Foram realizados ensaios de clarificação da água no *Jar test* com o extrato em pó e em solução salina, em dosagens várias dosagens e tempos de sedimentação a fim de avaliar a eficiência em remover turbidez e cor aparente. O extrato em pó apresentou aumento progressivo com a dosagem e tempo, com remoção de turbidez (87,8%) e cor aparente (92,5%) em 60 minutos. Já a solução salina apresentou resultados acima de 90% dos parâmetros para dosagens médias (60 a 150 mg/L), subdosagem em baixas doses (30mg/L) e sobredosagem altas doses (180 a 300 mg/L).

Palavras-chave:

Biocoagulante; coagulação/floculação; cor aparente; decantação; turbidez.

INTRODUÇÃO

A crescente degradação dos corpos hídricos, aliada ao aumento da demanda por água de boa qualidade, torna o tratamento de água uma prioridade ambiental e social, sobretudo em regiões que dependem de sistemas simplificados de captação de águas superficiais. Nesse contexto, garantir o fornecimento de água limpa e segura para uso humano é essencial para reduzir a disseminação de doenças de veiculação hídrica e promover a segurança em saúde. Dentro do tratamento de água as etapas de coagulação, floculação e decantação conhecidas como clarificação são empregadas para melhorar a qualidade da água (Koul *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, a clarificação da água utiliza coagulantes inorgânicos, como sais de alumínio ou ferro para promover a desestabilização de partículas coloidais, a agregação em flocos e posterior remoção por decantação ou filtração

(Gandiwa *et al.*, 2020). No entanto, esses coagulantes inorgânicos podem apresentar impactos ambientais e potenciais riscos à saúde, além de gerar lodo residual que exige disposição apropriada (Kurniawan *et al.*, 2020).

Nesse contexto, intensifica-se a busca por alternativas sustentáveis e de baixo custo para a clarificação da água. Os coagulantes orgânicos ou biocoagulantes são substâncias de origem natural capazes de promover a coagulação e a floculação, favorecendo a remoção de turbidez e de partículas em suspensão, sem os efeitos adversos frequentemente associados aos coagulantes inorgânicos (Koul *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023).

Entre os biocoagulantes promissores, as sementes do fruto *Carica papaya* Lam. (mamão) vêm recebendo atenção, tanto por sua disponibilidade em regiões tropicais quanto pelo potencial de aproveitamento de resíduos orgânicos. Dessa forma, explorar a utilização de sementes de mamão como biocoagulante para tratamento de água superficial converge com princípios de sustentabilidade, reaproveitamento de resíduos agrícolas e acesso à água potável em comunidades com recursos limitados. O presente trabalho busca investigar experimentalmente a eficiência do biocoagulante de sementes de mamão, definindo parâmetros ideais de dosagem e tempo de decantação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

TRATAMENTO DA ÁGUA E QUALIDADE AMBIENTAL

A qualidade da água desempenha um papel fundamental para a proteção da saúde humana e para a preservação dos ecossistemas. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), considera-se potável a água que pode ser ingerida ou utilizada em atividades domésticas, agrícolas ou industriais sem representar perigo à saúde da população (WHO, 2017).

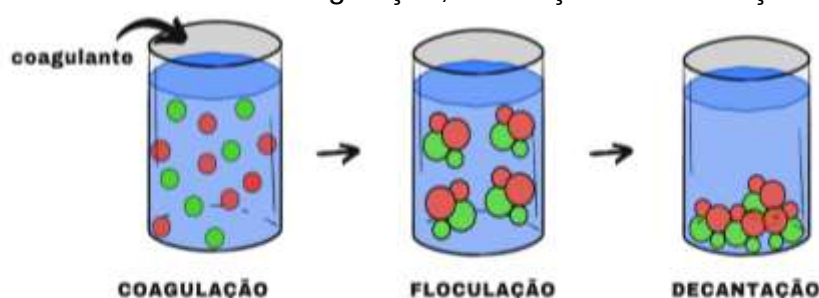
A degradação dos corpos hídricos tem se intensificado devido ao despejo de esgoto doméstico e industrial, juntamente com a entrada contínua de substâncias químicas no ambiente, o que compromete a qualidade da água e aumenta o risco de doenças de veiculação hídrica (Rocha, 2017; Balaram *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o tratamento adequado da água é uma prioridade para a saúde pública e para a gestão ambiental. Processos como coagulação, floculação e sedimentação desempenham papel fundamental na clarificação da água, promovendo a remoção de turbidez e cor aparente, aumentando a eficiência das etapas de filtração e desinfecção e assegurando o atendimento aos padrões de potabilidade estabelecidos por normas nacionais e internacionais (Brasil, 2021; WHO, 2017).

CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA: COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E DECANTAÇÃO

A clarificação da água constitui uma etapa essencial no tratamento de águas superficiais. Esse processo envolve, principalmente, as fases de coagulação, floculação e decantação, cujo objetivo é remover partículas finas e coloidais que não se sedimentam de forma espontânea (Ismail; Pires, 2022) (Figura 1)

Figura 1 - Processo de coagulação, floculação e decantação.



Fonte: Santos *et al.* (2024).

A coagulação consiste na adição de um agente capaz de desestabilizar partículas coloidais presentes na água, as quais, em geral, possuem carga superficial negativa e permanecem em suspensão pela repulsão eletrostática. Ao ser introduzido no meio, o coagulante neutraliza essas cargas, reduzindo as forças de repulsão e permitindo a aproximação e o início da agregação das partículas. Essa etapa ocorre em poucos segundos ou minutos e exige mistura rápida e intensa, garantindo a distribuição uniforme do coagulante e o contato eficiente com os coloides (Alazaiza *et al.*, 2022; El Ouadrhiri *et al.*, 2025).

A eficiência da coagulação depende de fatores operacionais, como tipo e dosagem do coagulante, intensidade da mistura e tempo de decantação, que influenciam diretamente a qualidade da água tratada (Alazaiza *et al.*, 2022).

Após a coagulação, inicia-se a floculação, uma fase de mistura lenta e controlada que visa promover colisões entre as partículas desestabilizadas, formando flocos para que possam sedimentar posteriormente (El Ouadrhiri *et al.*, 2025).

A etapa seguinte, a decantação, consiste na separação física entre os flocos formados e a água clarificada, sendo o tempo de sedimentação um parâmetro crítico que influencia diretamente a eficiência da remoção (Martins *et al.*, 2022).

De forma integrada, coagulação, floculação e decantação constituem o conjunto essencial de operações do processo de clarificação, cuja eficiência depende diretamente do tipo de coagulante, da dosagem aplicada e do tempo de sedimentação (Mensah-Akutteh *et al.*, 2022; Sheng; Bilad; Shamsuddin, 2023).

COAGULANTES INORGÂNICOS

Na clarificação da água é comumente empregado o uso de coagulantes inorgânicos como o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), cloreto de polialumínio (PAC) e cloreto férrico (FeCl_3) (Halder, 2021). Os coagulantes inorgânicos possuem alta eficiência em baixas concentrações, podem operar em uma ampla faixa de variação do pH, tem alta dissolução em água e alta taxa de remoção de turbidez (Koul *et al.*, 2022). Os coagulantes inorgânicos podem desencadear diferentes mudanças na composição físico-química da água, tais como: alteração da alcalinidade, aumento da concentração residual de metais e possibilidade de causar corrosão nas tubulações (Chiavola *et al.*, 2023; Kurniawan *et al.*, 2022;).

O uso dos coagulantes inorgânicos ainda apresenta certas desvantagens operacionais, tais como: sensibilidade as mudanças de pH com a redução da alcalinidade da água; redução de eficácia em temperaturas baixas, corrosão dos equipamentos e instrumentos e produção de lodo final não degradável (Chiavola *et al.*, 2023; Gandiwa *et al.*, 2020; Tie *et al.*, 2019). Ainda, o custo alto com aquisição dos coagulantes e a sua disponibilidade, que ainda são obstáculos à implementação em países e regiões pobres (Yin *et al.*, 2010).

No Brasil, o sulfato de alumínio é o coagulante inorgânico mais utilizado, devido ao baixo custo e boa eficiência (Abreu, 2019; Moraes; Schneider; Carissimi, 2019). No entanto, a preocupação com seu uso está relacionada com a toxicidade, já que aumenta a quantidade de espécies de alumínio dissolvido nas águas e pode afetar a saúde humana; e com a poluição ambiental, já que não são biodegradáveis (D'Haese *et al.*, 2019; Koul *et al.*, 2022; Kurniawan *et al.*, 2020).

Destaca-se que já foram detectados traços de metais não degradáveis oriundos de coagulantes inorgânicos em células do corpo humano a partir do consumo de água potável (Kluczka *et al.*, 2017). Descobertas recentes correlacionaram as altas concentrações de alumínio (Al) a doenças neurotóxicas, como o Alzheimer (Chagas; Faria, 2022; D'Haese *et al.*, 2019; Exley; Mold, 2019; Mold *et al.*, 2020). Casos como esclerose lateral amiotrófica (ELA), Parkinson, síndrome de Down e transtornos do espectro autista (TEA) também foram relatados e correlacionadas com a presença de alumínio (Krupinska, 2020; Mold *et al.*, 2018).

BIOCOAGULANTES COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL

Os bioacoagulantes (coagulantes naturais ou biopolímeros) são polieletrólitos que podem ser encontradas em polímeros aniônicos, catiônicos ou neutros (Yin, 2010). Ainda, eles podem ser classificados a partir de sua fonte de origem, como: animal, microbiana e vegetal (Kurniawan *et al.*, 2020).

Os coagulantes a base animal e microbiana podem ser aniônicos, catiônicos ou polieletrólitos com dupla carga (Zhu *et al.*, 2021). Os coagulantes vegetais são comumente mais empregados devido à sua relação custo-benefício ser superior aos de origem animal e microbiana (Kong *et al.*, 2021). Ainda, esses podem ser extraídos de diferentes componentes das plantas e vegetais, tais como: folhas, sementes, cascas dos frutos e árvores e os próprios resíduos do beneficiamento (Adrin *et al.*, 2024). No Brasil, em decorrência de sua grande biodiversidade, há possibilidade do emprego de diversas espécies vegetais que apresentam propriedades para uso na etapa de coagulação (Santos; Valverde, 2023).

Vários estudos demonstraram a eficiência de diferentes tipos de biocoagulantes, tais como: *Moringa oleifera* (Santos, 2025; Adesina *et al.*, 2019; Coldebella *et al.*, 2023; Gandiwa *et al.*, 2020; Michelin *et al.*, 2021; Santana *et al.*,

2020; Valverde *et al.*, 2014), pectina de laranja (Kebaili *et al.*, 2018), amido de banana (Tovar *et al.*, 2020) *Cactus opuntia* (cacto) (Sethu *et al.*, 2019; Gandiwa *et al.*, 2020), *Aloe vera* (babosa) (Rodrigues; Aquino; Cordeiro, 2020; Benalia *et al.*, 2021; Katubi *et al.*, 2021), *Anacardium occidentale* (caju) (Anjos, 2021), *Solanum tuberosum* (batata) (Caso; Quispe; Deudor, 2021), *Macrolobium acaciifolium* (arapari) (Correia *et al.*, 2022).

Assim, diante de todos os riscos associados ao emprego dos coagulantes inorgânicos os cenários atuais oferecem aos biocoagulantes uma emergente alternativa mais segura no emprego do tratamento de águas para consumo humano e ao meio ambiente (Tolkou *et al.*, 2021; Koul *et al.*, 2022; Kingue; Njila; Ndongo, 2023). A literatura mostra um vasto histórico da eficácia de remoção de materiais e substâncias suspensas presentes nas águas (Ang *et al.*, 2020).

A menor produção de lodo a partir da aplicação de biocoagulantes é uma vantagem inerente ao seu uso, o que ocasiona a redução nos gastos com as etapas de gerenciamento e descartes dos resíduos, aumentando a sua sustentabilidade (Alazaiza *et al.*, 2022; Bahrodin *et al.*, 2021; Owodunni; Ismail, 2021). A redução dos custos com coagulantes é atribuída aos processos de neutralização de cargas e formação de polímeros que formam flocos menores, consequentemente produzindo menos lodo (Owodunni; Ismail, 2019).

Outra vantagem é a redução da adição de cargas de metais durante o tratamento de água (Koul *et al.*, 2022). A biodisponibilidade é outro aspecto positivo dos coagulantes naturais, contribuindo para sua sustentabilidade (Koul *et al.*, 2020; Saleem; Bachmann, 2019). Em suma, todas essas vantagens reforçam sua aptidão como alternativa sustentável (Koul *et al.*, 2022).

SEMENTES DE MAMÃO (*CARICA PAPAYA LAM*) COMO BIOCOAGULANTE

O emprego da semente de mamão como um agente coagulante se dá pela presença de proteínas eletricamente positivas (protease), que permitem a agregação das partículas como carga elétrica negativa, resultando na formação de flocos densos capazes de sedimentar e clarificar as águas (Yimer; Dame, 2021; Adrin *et al.*, 2024). A protease é altamente solúvel em água e contribui para a formação dos flocos (Unissa; Bi, 2018). Os fatores responsáveis pela agregação são o longo

comprimento da cadeia e alto peso molecular das proteínas, que reduzem a turbidez (Benalia *et al.*, 2023; Sugiharto, 2020).

A interação da protease com as partículas presentes na água ocorre pelos mecanismos de adsorção e neutralização de cargas e adsorção e formação de pontes (Benalia *et al.*, 2023; Othmani; Rasteiro; Kradhraqui, 2020; Sugiharto, 2020), que permitem a agregação e formação dos flocos e clarificação da água (Adrin *et al.*, 2024).

Ainda, nas sementes de mamão há grupos funcionais constituídos por radicais livres (OH e NH), grupos de amidas, carbonilas (C=O) e aminoácidos em sua estrutura proteica. Esses componentes sugerem a capacidade de formação de ligações fortes com as partículas carregadas negativamente, por meio de interações intermoleculares, como as ligações de hidrogênio, permitindo a agregação e remoção dos sólidos e contaminantes presentes na água (Cadena-Álava *et al.*, 2024; Putra; Amri; Ayu, 2020).

Em aplicações de tratamento de água, o pó em semente de mamão é o método de extração mais utilizado, devido a sua capacidade de se ligar a partículas sólidas em suspensão nas soluções aquosas e possibilitar a sedimentação. O uso do cloreto de sódio (NaCl) é bastante comum em ensaios de tratabilidade utilizando o mamão, pois é um método capaz de permitir o isolamento das proteínas que se comportam como polieletrólitos durante a coagulação. Associado a esses pontos, a composição de resíduos de gorduras como os lipídeos influenciam na melhora de aglomeração (Cadena-Álava *et al.*, 2024; Muda *et al.*, 2020; Fatombi *et al.*, 2013; Putra; Amri; Ayu, 2020;)

Na literatura há poucas pesquisas que investigaram a aplicação da semente de mamão como agente coagulante no tratamento de águas para consumo humano (Amran *et al.*, 2021). A maior parte destes trabalhos são oriundos do continente africano e asiático.

Yimer e Dame (2021) realizaram ensaios de coagulação da água para consumo humano na Etiópia, utilizando diferentes tipos de extratos. Para a água bruta com turbidez de 392,7 NTU, os pesquisadores obtiveram remoções de 81,9%, 87,0% e 95,9%, para os extratos aquoso, solução salina e solução salina após retirada de lipídeos, respectivamente.

Outro exemplo é a pesquisa de Ojo *et al.* (2024), que avaliaram a eficiência dos coagulantes a base de pó de sementes de mamão em águas superficiais na Nigéria, e obtiveram redução de 74,5% na turbidez ao término dos ensaios.

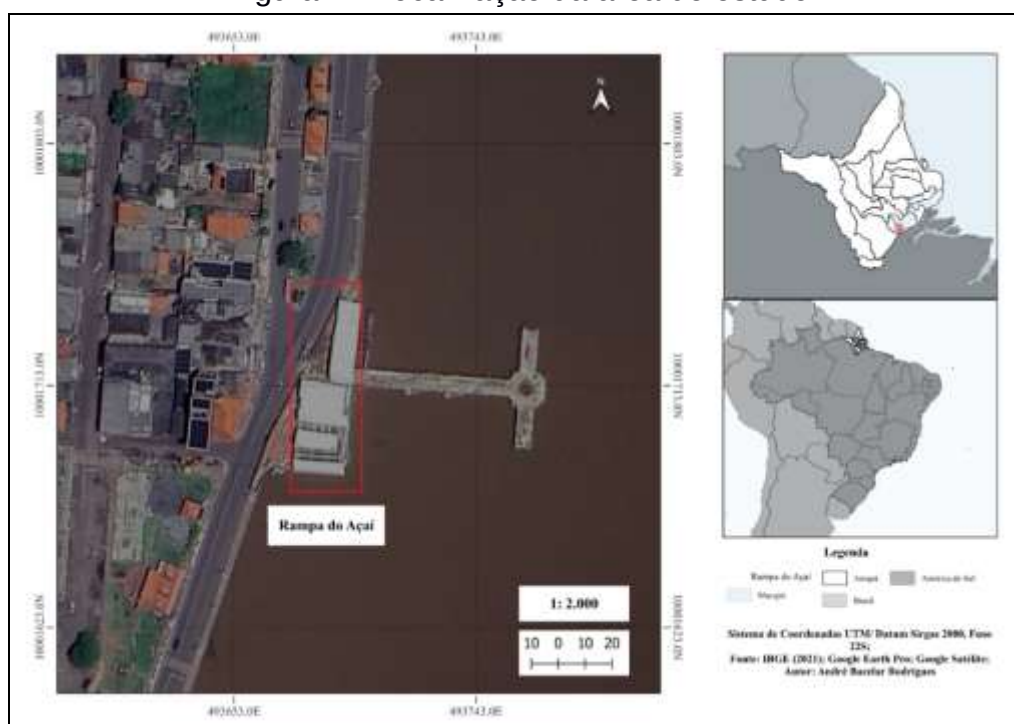
Na Ásia, inúmeras pesquisas empregam sementes de mamão, porém, são poucas destinadas a água para consumo humano. A exemplo, o trabalho de Willanda *et al.* (2023) realizado na Indonésia, com remoção de turbidez de 89,3% para águas superficiais. Destaca-se que a aplicação deste promissor biocoagulante na Amazônia brasileira ainda não foi bem explorada. Deste modo, ensaios de tratabilidade com sementes de mamão podem contribuir para auxiliar no desenvolvimento de metodologias eficazes e ambientalmente adequadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A localização da área de estudo envolve a rampa do Açaí, localizado na orla do rio Amazonas em Macapá (AP), com as seguintes coordenadas geográficas 0° 0'55.71"N e 51° 3'24.06"W (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2026).

FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS E MATERIAIS

Os ensaios foram realizados dia 27 de novembro de 2026 no Laboratório de Química, Saneamento e Modelagem Ambiental (LABQSAMB) do curso de Ciências Ambientais, da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). As condições de operação programadas no Jar Test foram baseadas no estudo de Amran *et al.* (2021) e os procedimentos estão descrito na figura 3:

- Velocidade de mistura rápida (VMR): 250 rpm;
- Tempo de mistura rápida (TMR): 3 min;
- Velocidade de mistura lenta (VML) 20 rpm;
- Tempo de mistura lenta (TML) 15 min.
- Tempo de sedimentação (TS): 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min.

Figura 3 - Fluxograma do procedimentos e materiais.



Fonte: Autoria própria (2026).

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA

A tabela 1 apresenta a caracterização da água bruta para os parâmetros físicos turbidez, cor aparente e temperatura e para o químico potencial hidrogeniônico.

Tabela 1 - Caracterização da água bruta.

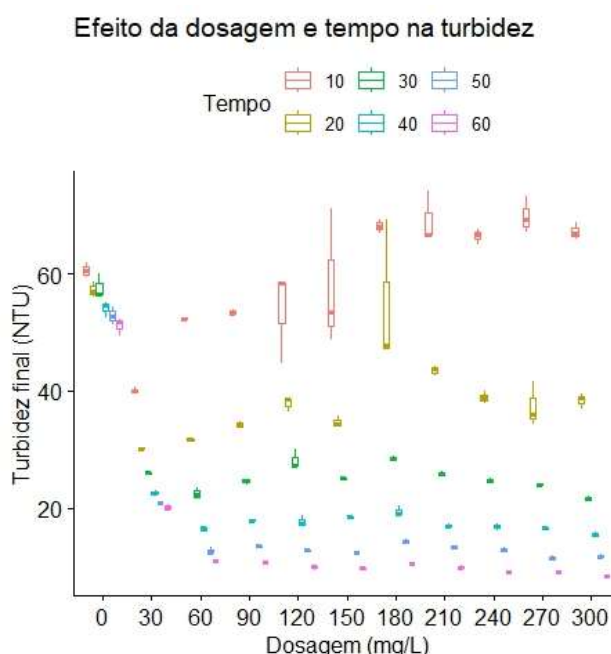
Parâmetros	Unidade	Média
Turbidez	NTU	68,4 ± 2,0
Cor aparente	uH	500 ± 6,4
Temperatura	°C	27,8 ± 0,1
pH		7,5 ± 0,3

Fonte: Autoria própria (2026).

EXTRATO EM PÓ DE *CARICA PAPAYA LAM*

A remoção da turbidez (Figura 4) aumentou conforme aumento da dosagem do extrato de coagulante em pó de semente de mamão e com o aumento do tempo de sedimentação, resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Yimer e Dame (2021). Os menores valores médios (8,3 NTU) foram encontrados na dosagem de 300 mg/L no tempo de 60 minutos com uma remoção de 87,8%. Nos estudos de Ojo (2024) e Suprawito *et al* (2020) utilizando o extrato em pó de *C. papaya* encontraram a remoção de 74,5% e 99,94% de turbidez respectivamente.

Figura 4 - Variação da turbidez em função da dosagem.



Fonte: Autoria própria (2026).

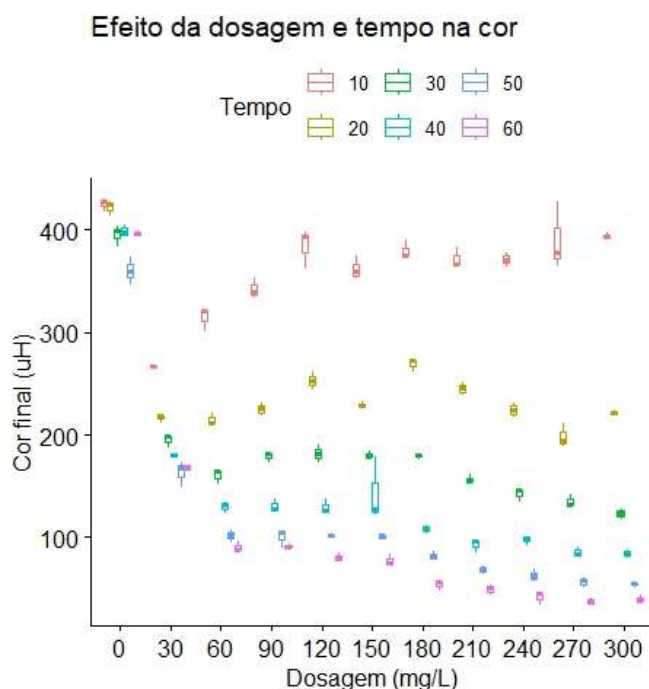
A maior remoção em altas dosagens pode ser atribuída a neutralização das cargas a partir das proteínas positivas de protease e com o aumento progressivo

das dosagens, permitiu o aumento das colisões e desestabilizações dos colóides (Nhut, Hung, Lap, 2021). Essa condição demonstra que a quantidade de proteínas com carga positiva liberadas pelo biocoagulante é proporcional às cargas negativas dos colóides, tornando o processo bastante eficaz (Zaidi *et al.*, 2019).

Ainda, nas sementes de mamão há grupos funcionais constituídos por radicais livres (OH e NH), grupos de amidas, carbonilas (C=O) e aminoácidos em sua estrutura proteica. Esses componentes sugerem a capacidade de formação de ligações fortes com as partículas carregadas negativamente, por meio de interações intermoleculares, como as ligações de hidrogênio, permitindo a agregação e remoção dos sólidos e contaminantes presentes na água (Cadena-Álava *et al.*, 2024; Putra; Amri; Ayu, 2020).

A remoção da cor aparente (Figura 5) também seguiu o comportamento da turbidez sendo maior com o aumento da dosagem e o tempo de sedimentação. As maiores remoções se concentraram no tempo de sedimentação de 60 minutos e nas dosagens de 270 mg/L e 300 mg/L, sendo a primeira a alcançar o maior percentual de 92,5% e valores médios de 37,3 uH. Resultados parecidos foram encontrados no estudo de Zyulaida, Puspitasari e Putra (2025) que com 0,5 g/L conseguiram obter uma remoção de 99,34% da cor aparente.

Figura 5 - Variação da cor aparente em função da dosagem.

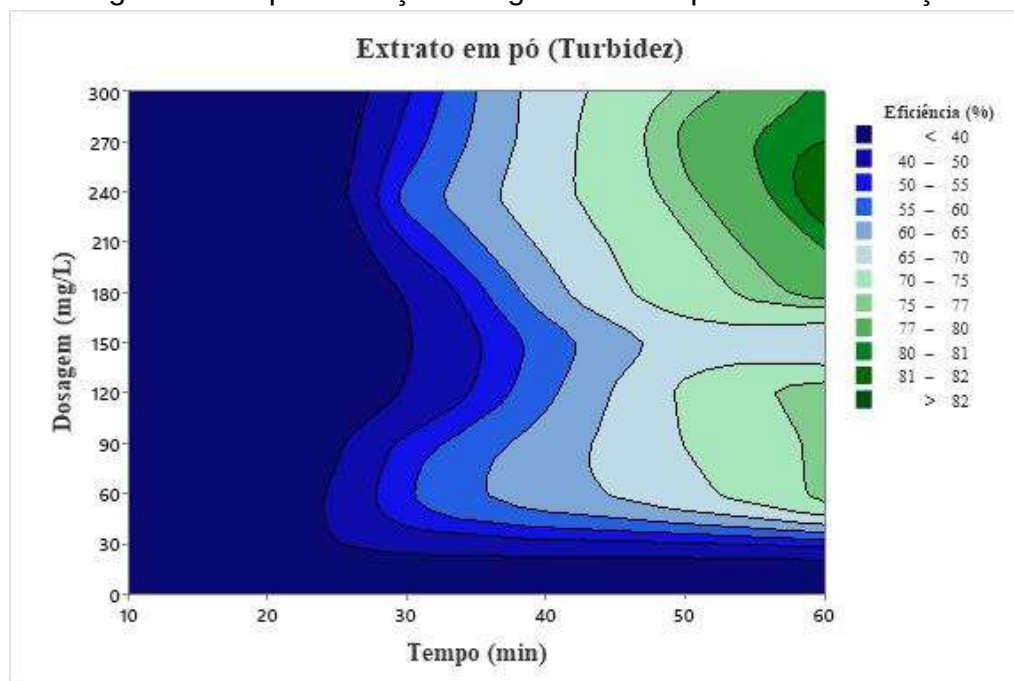


Fonte: Autoria própria (2026).

O comportamento dos resultados obtidos de turbidez e cor aparente para o pó em semente de *C.papaya Lam* em gráficos de superfície de resposta são apresentados nas figuras 6 e 7. A remoção de turbidez variou de 11,4% a 87,8%, sendo que houve aumento com no decorrer do tempo de sedimentação. Apesar do progressivo tempo, o controle (0 mg/L) não obteve valores expressivos de remoção, sendo o maior registrado a 60 minutos com 25,2%. Esses resultados indicam que a sedimentação natural por atuação da gravidade não tão eficiente (Santos, 2025).

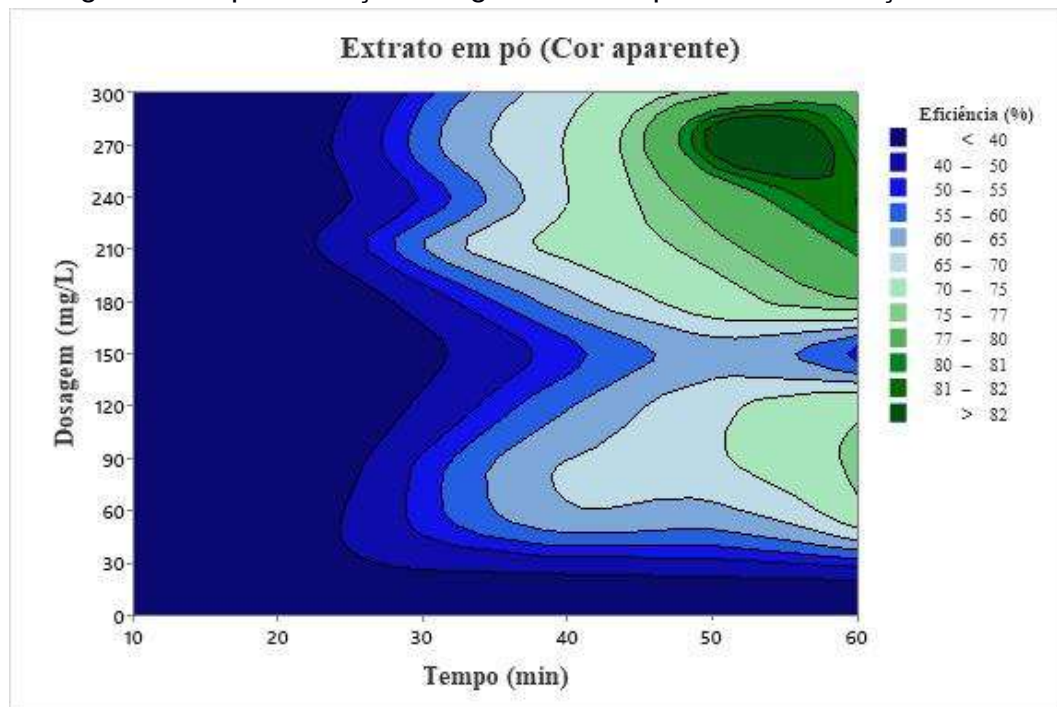
A partir da aplicação do biocoagulante, percebeu-se que houve redução dos valores de turbidez. As maiores remoções acima de 70% encontraram-se nas dosagens com maior tempo de sedimentação (50 a 60 minutos). Entretanto, as dosagens de 240 mg/L e 300 mg/L foram as que apresentaram eficiências acima de 80%. Autores como Megersa *et al.* (2016) destacam que a dosagem é fundamental para o processo de coagulação e floculação. Yimer e Dame (2021) ressaltam que a subdosagem (dosagens baixas) podem conduzir a um processo de neutralização de cargas dos coloides ineficaz causando um desempenho ruim do processo de coagulação

Figura 6 - Representação em gráfico de superfície da variação da turbidez.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 7- Representação em gráfico de superfície da variação da cor aparente.



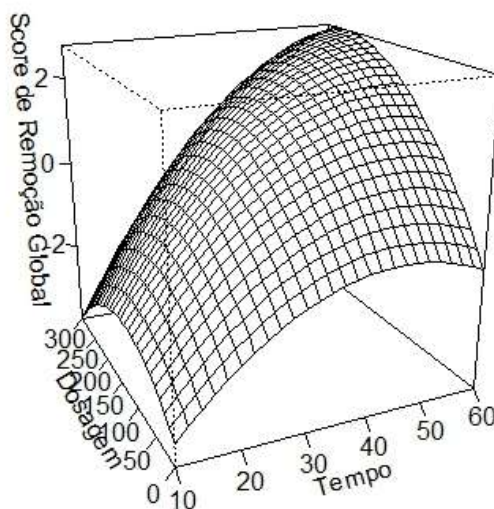
Fonte: Autoria própria (2026).

A remoção da cor aparente variou de 14,9% a 92,5% possuindo melhores resultados (>80%) nas dosagens acima de 210 mg/L e nos tempos de sedimentação de 50 a 60 minutos. O controle obteve a melhor taxa de remoção com o tempo de 50 minutos com cerca de 28% de redução da cor aparente. A dosagem de 270 mg/L foi a que mais eficiente com a redução de 92,5% e uma média de 37,3 uH.

A análise de variância fatorial indicou que a turbidez é influenciada pelo tempo de sedimentação ($p < 0,001$). Ao analisar pelo teste Tukey, verificou-se que as dosagens próximas e intermediárias (30 mg/L a 150 mg/L) não possuem diferenças significativas, logo em análise para dosagens intermediárias o aumento da dosagem não melhora significativamente a remoção de turbidez e cor aparente. Na figura 8 abaixo, é representado a plotagem das variáveis turbidez e cor aparente em função da dosagem de biocoagulante e tempo de sedimentação.

Figura 8 - Otimização conjunta da turbidez e cor aparente na análise de superfície de resposta.

Otimização Conjunta: Turbidez + Cor



Fonte: Autoria própria (2026).

Neste gráfico a inclinação da curva de remoção global para o lado positivo evidencia que as dosagens maiores foram mais eficientes em remover turbidez e cor aparente da água. Comportamento como este foi observado no estudo de Amran *et al* (2021) aplicando a superfície de resposta e observou que a redução da turbidez foi observada com o aumento da dosagem de 50 mg/L até a faixa de 200 mg/L.

Apesar de as maiores dosagens de biocoagulante apresentarem maiores valores de remoção, elas não apresentam diferenças significativas entre si ($p > 0,05$). Logo, a dosagem ideal não está diretamente relacionada com o aumento da dosagem, porém, está diretamente relacionada com o aumento do tempo de sedimentação.

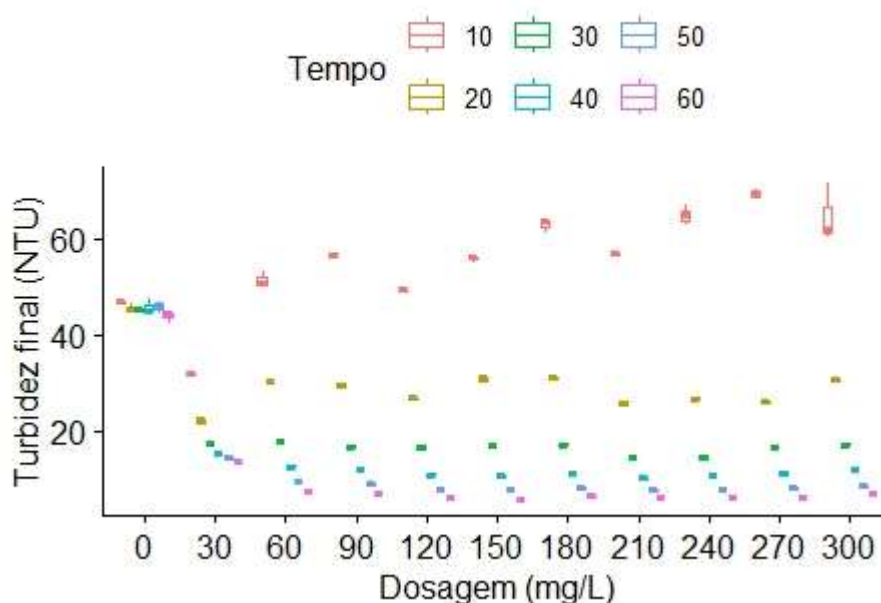
SOLUÇÃO SALINA DE C.PAPAYA

A redução da turbidez (Figura 9) pela atuação do extrato salino ocorreu bem diferente do extrato em pó. O controle (0 mg/L) não apresentou redução expressiva, tendo o valor máximo de 25,2% de remoção de turbidez. Em 30 mg/L a turbidez apresenta-se alta quando comparada as demais dosagens, caracterizando o efeito

de subdosagem dificultando a neutralização dos coloides e permitindo o aumento da turbidez (Yimer e Dame, 2021). Nas demais dosagens o tempo inicial de 10 minutos apresentou menores valores de remoção, enquanto os tempos máximos de 60 minutos foram os que alcançaram valores menores de turbidez

Figura 9 - Variação da turbidez em função da dosagem.

Efeito da dosagem e tempo na turbidez



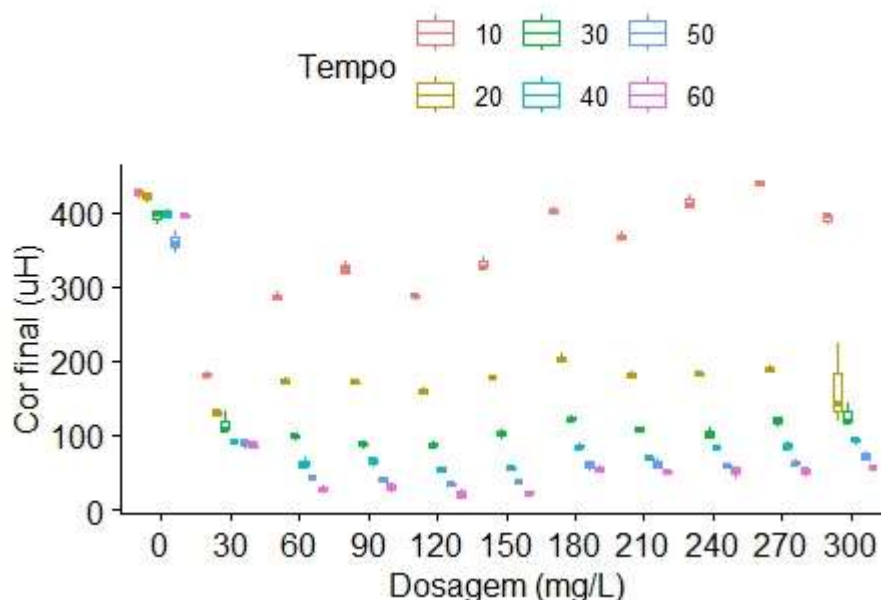
Fonte: Autoria própria (2026).

A emprego do cloreto de sódio (NaCl) é bastante comum dentro do tratamento com biocoagulantes, devido a sua capacidade de isolamento de polieletrólitos (Putra; Amri; Ayu, 2020). O NaCl devido a sua alta solubilidade é capaz de remover a turbidez da água, o que diretamente irá influenciar numa menor necessidade de biocoagulante). Isso ocorre porque o NaCl atua na modificação da dupla camada elétrica das partículas e influenciando na neutralização e desestabilização das partículas (Adrin *et al.*, 2024).

A cor aparente (Figura 10) apresentou o comportamento de subdosagem também para 30 mg/L que acaba comprometendo a aglutinação das partículas (Michelan *et al.*, 2019) e de sobredosagem a partir da dosagem de 180 mg/L a 300 mg/L. Este processo consiste na re-estabilização dos coloides e sua resuspensão devido as altas concentrações de biocoagulantes, levando da turbidez (Yimer, Dame, 2021; Akpomie *et al.*, 2018).

Figura 10 -- Variação da cor aparente em função da dosagem.

Efeito da dosagem e tempo na cor



Fonte: Autoria própria (2026).

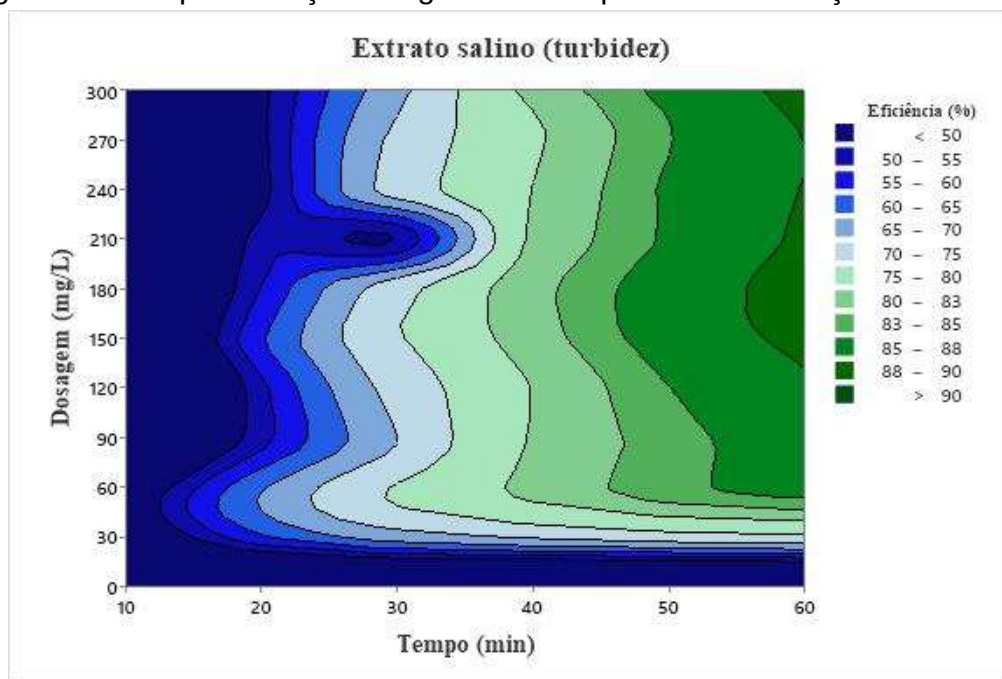
Na faixa de 60 mg/L a 150 mg/L, houve os menores valores de cor aparente após atuação do biocoagulante junto com o extrato salino, em destaque as dosagens de 120 e 150 mg/L que conseguiram valores de 20,7 e 21,7 uH. O comportamento dos resultados obtidos de turbidez e cor aparente para o extrato salino de semente de *C.papaya Lam* em gráficos de superfície de resposta são apresentados nas figuras.

Os gráficos de análise de superfície para turbidez (Figura 11 e 12) mostram a tendência de alcançar maior eficiência de remoção para cada dosagem ao longo do tempo de sedimentação. O controle obteve baixas taxas de redução de turbidez. A dosagem menor de 30 mg/L obteve valores de remoção de 53,7% em 10 minutos e o máximo de 80,4% em 60 minutos, indicando que mesmo em pequenas concentrações os compostos extraídos influenciam na remoção de turbidez (Adrin *et al.*, 2025).

As dosagens intermediárias 60, 90, 120, 150, 180 e 210 mg/L tiveram uma crescente remoção de turbidez em função do tempo de sedimentação, com a porcentagem chegando a 90% de remoção, com destaque para dosagem de 150 mg/L que obteve 91,9% de eficiência em 60 minutos. Entretanto, com as maiores dosagens apresentaram redução da eficiência ao longo do tempo, caracterizando o

processo de sobredosagem. Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Adrin *et al* (2025) e Amran *et al* (2021).

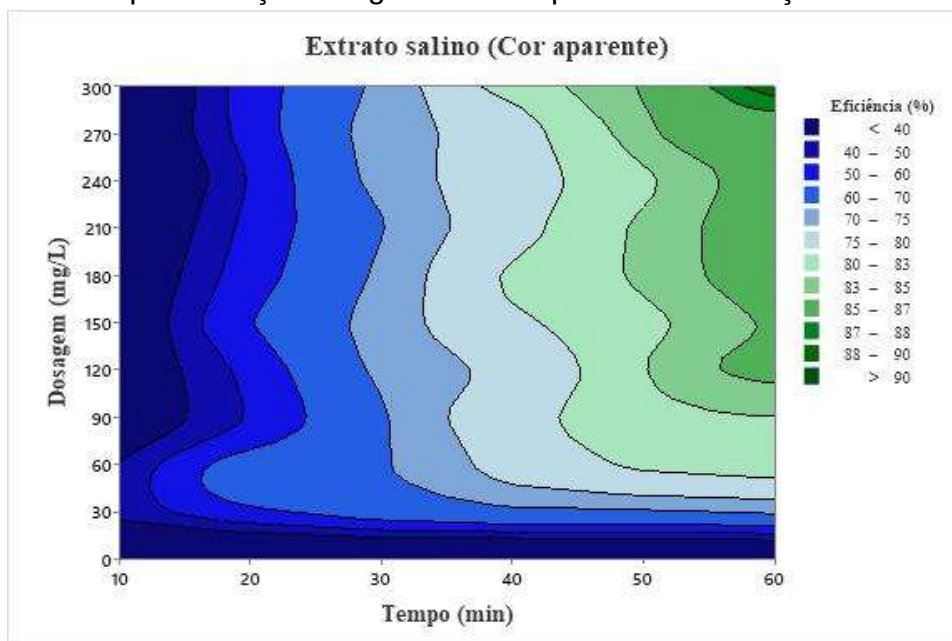
Figura 11 - Representação em gráfico de superfície da variação da turbidez.



Fonte: Autoria própria (2026).

O controle (0 mg/L) não obteve eficiência significativa na redução da cor aparente, tendo 28% de remoção em 50 minutos. A faixa de 30 mg/L apesar de uma menor concentração de biocoagulante conseguiu alcançar uma progressiva redução ao longo do tempo, chegando a 82,7% (81 uH) de eficiência em 60 minutos. As dosagens intermediárias 60, 90, 120 e 150 mg/L também tiveram progressivo crescimento de remoção alcançando valores acima de 90%, como 95,9% e 95,7% para 120 mg/L e 150 mg/L.

Figura 12 - - Representação em gráfico de superfície da variação da cor aparente.



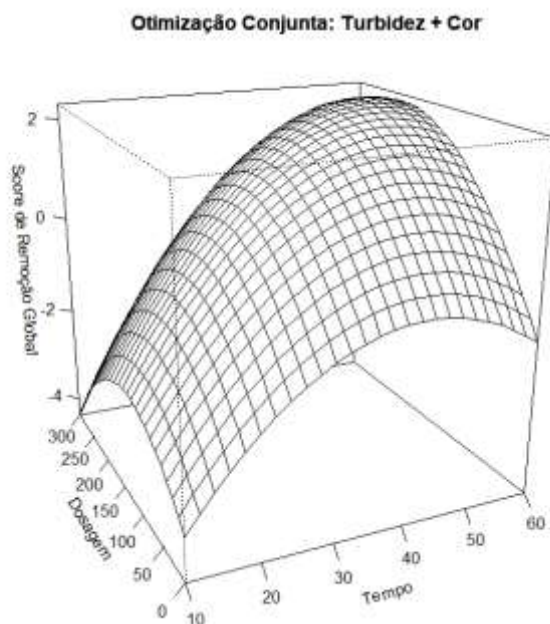
Fonte: Autoria própria (2026).

As dosagens mais altas tiveram uma redução na porcentagem de remoção com valores abaixo de 90%, esse aumento da cor aparente coincide com o aumento da turbidez. Esse fenômeno pode acontecer ao exceder a dosagem ideal, pois há o acúmulo de cargas que possuem a mesma carga elétrica e não conseguem interagir, aumentando a cor e turbidez (Cadena; Cevallos; Garcia, 2024).

A análise de variância fatorial indicou que a turbidez é influenciada pelo tempo de sedimentação ($p < 0,001$) e o teste tukey apontou ausência de diferenças significativas ($p > 0,05$) entre dosagens próximas e faixas intermediárias. No gráfico de análise de superfície de resposta (Figura 13) a baixa curvatura nas primeiras dosagens evidencia que a baixos tempos de sedimentação (10 e 20 minutos) não há remoção de turbidez e cor aparente de forma efetiva, devido à falta de tempo suficiente para formação e crescimento do flocos (Score negativo).

Ao longo do tempo e dosagem ocorre o crescimento do score e com este o aumento da remoção de turbidez e cor aparente até uma faixa constante próximo dos 50 minutos. Com passar do tempo e dosagem do biocoagulante ocorre o decaimento da score, indicando redução na eficiência devido a sobredosagem (Amran *et al.*, 2021). Logo, a dosagem ideal está relacionada com o aumento do tempo de sedimentação até o limite de 50 minutos nas dosagens intermediárias.

Figura 13 - Otimização conjunta da turbidez e cor aparente na análise de superfície de resposta.



Fonte: Autoria própria (2026).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o biocoagulante de sementes de *C.papaya* apresenta alto potencial para remoção de turbidez e cor aparente da água para os extratos em pó e solução salina, porém com desempenho distinto em função da dosagem e tempo de sedimentação.

O extrato em pó apresentou aumento na remoção progressivamente com a dosagem e tempo de sedimentação, sendo o último considerado o principal fator de influência ($p < 0,001$). A maior remoção de turbidez foi de 87,8% e cor aparente de 92,5% no tempo de 60 minutos. Para o extrato salino diferiu um pouco do extrato anterior, com a ocorrência de subdosagem (30 mg/L) e sobre dosagem (180 a 300 mg/L). A dosagem ideal está dentro das faixas intermediárias (60 a 150 mg/L), com remoções superiores a 90% e dependendo do aumento do tempo de sedimentação.

O controle (0 mg/L) apresentou baixos percentuais de remoção, evidenciando que a sedimentação natural não é suficiente para clarificação efetiva da água. Contudo, o emprego da *C.papaya* apresenta alto potencial de aplicação como biocoagulante dependendo da articulação adequada da dosagem e tempo.

REFERÊNCIAS

ALAZAIZA, M. Y.; ALBAHNASAWI, A.; ALI, G. A.; BASHIR, M. J.; NASSANI, D. E.; AL MASKARI, T.; AMR, S. S. A.; ABUJAZAR, M. S. S. Application of natural coagulants for pharmaceutical removal from water and wastewater: a review. **Water**, v. 14, n. 2, p. 140, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14020140>

BALARAM, V.; COPIA, L.; KUMAR, U. S.; MILLER, J.; CHIDAMBARAM, S. Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management—A comprehensive review. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 2, p. 1-24, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº. 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº. 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021. Edição 85, Seção 1, p.127.

EL OUADRHIRI, F.; SALEH, E. A. M.; LAHKIMI, A. From Mineral Salts to Smart Hybrids: Coagulation–Flocculation at the Nexus of Water, Energy, and Resources—A Critical Review. **Processes**, v. 13, n. 11, p. 3405, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13113405>

GANDIWA, B. I.; MOYO, L. B.; NCUBO, S.; MAMVURA, T. A.; MGUNI, L. L.; HLABANGANA, N. Otimização do uso de uma mistura de coagulantes naturais e sintéticos à base de plantas para o tratamento de água: (Moringa oleifera-Cactus e Opuntia-alum blend). **Revista Sul-Africana de Engenharia Química**, v. 34, p. 158-164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.07.005>

ISMAIL, I. A. L.; PIRES, E. C. avaliação do tratamento por clarificação da água de lavagem de filtros de estação de tratamento de água convencional. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 15, n. 2, p. 745-756, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79426>

KOUL, B.; BHAT, N.; ABUBAKAR, M.; MISHRA, M.; ARUKHA, A. P.; YADAV, D. Application of natural coagulants in water treatment: A sustainable alternative to chemicals. **Water**, v. 14, n. 22, p. 1-27, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14223751>

KURNIAWAN, S. B.; ABDULLAH, S. R. S.; IMRONET, M. F.; DISSE, N. S. M.; ISMAIL, N.; HASAN, H. A.; OTHMAN, A. R.; PURWANTI, I. F. Desafios e oportunidades da aplicação de biocoagulantes/biofloculantes para o tratamento de água potável e efluentes e seu potencial para recuperação de lodo. **Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública**, v. 17, n. 24, p. 1-33, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>