



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Guilherme Lins Morais

Otimização do tratamento de águas residuárias de mineração por meio de coagulantes naturais

Ouro Preto

2023

Otimização do tratamento de águas residuárias de mineração por meio de coagulantes naturais

GUILHERME LINS MORAIS

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação:

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. D.Sc. Múcio André dos Santos Alves Mendes – UFOP

Orientadora: M.Sc. Paula Cristine Silva Gomes - UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M827o Morais, Guilherme Lins.

Otimização do tratamento de águas residuárias de mineração por meio de coagulantes naturais. [manuscrito] / Guilherme Lins Morais. - 2023.

46 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadores: Prof. Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes, Ma. Paula Cristine Silva Gomes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Compostos poliméricos - Coagulantes naturais. 2. Polímeros - Tanfloc. 3. Plantas úteis - Moringa (Moringa oleifera) - Sementes. 4. Águas residuais - Purificação. I. Gomes, Paula Cristine Silva. II. Mendes, Múcio André dos Santos Alves. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Lins Morais

Otimização do tratamento de águas residuárias de mineração por meio de coagulantes naturais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 29 de março de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes - Orientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me . Paula Cristine Silva Gomes - Orientadora - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me . Isabel Francisco de Araújo Reis - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. Dra. Tamara Daiane de Souza - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Múcio André dos Santos Alves Mendes, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Múcio André dos Santos Alves Mendes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2023, às 12:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0560413** e o código CRC **BE2CAF3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Margareth, a minha irmã Daniela e aos amigos por todo apoio dado durante a realização deste trabalho. A todos meus colegas da UFOP que ajudaram de alguma forma a enriquecer este texto com conhecimentos técnicos e informações. Agradeço ao meu orientador professor Múcio, a minha orientadora Paula e a todas as meninas do Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) pelo apoio. Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG por todo suporte financeiro. E agradeço, também, ao laboratório de Saneamento por ceder o espaço para que eu pudesse realizar todos os ensaios para elaboração desta.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a ação do Tanfloc e da semente de Moringa, como coagulantes, no tratamento de águas residuárias provenientes da atividade minerária, para a redução da turbidez. A resolução CONAMA 357 estabelece que em rios de água doce, a turbidez máxima permitida é de 40NTU. Tendo em vista o aumento da turbidez em corpos hídricos, em decorrência, sobretudo do escoamento superficial ao redor dos complexos minerários, faz-se essencial o estudo de tratamentos que melhorem a qualidade das águas. Destacam-se os coagulantes naturais como alternativas eficazes, de baixo custo e ambientalmente seguras, em comparação aos coagulantes químicos. Nesse trabalho foi avaliado o desempenho do Tanfloc e da semente de Moringa, visando a diminuição da turbidez da água. Inicialmente, foram adotados parâmetros definidos por Di Bernardo (2011), em que se estabeleceu a adição de diferentes dosagens dos coagulantes, com tempo de coagulação/floculação de 20 min e tempo de sedimentação de 2 min. As melhores condições observadas foram em pH 10,85 e 80,00mg/L para o Tanfloc, e pH 7,88 e 51,03mg/L para a semente de Moringa, onde ambos reduziram em 90% e 80% da turbidez inicial (2000 a 2500NTU), respectivamente. Ainda, para a otimização dos resultados, foram utilizados modelos matemáticos para gerar uma superfície resposta, visando obter a resposta mais eficaz entre a combinação das variáveis pH e dosagem. O modelo escolhido para este trabalho foi o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). De forma geral, os resultados obtidos são promissores e demonstram uma possibilidade real de substituição ou a utilização dos mesmos como auxiliares dos coagulantes industrializados que são comumente utilizados para tais processos.

Palavras-chaves: Coagulantes naturais, Tanfloc, Semente de Moringa, Turbidez, Superfície Resposta.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the action of Tanfloc and Moringa seed as coagulants in the treatment of wastewater from mining activities to reduce turbidity. The CONAMA 357 resolution establishes that in freshwater rivers, the maximum turbidity allowed is 40NTU. In view of the increase in turbidity in water bodies, mainly due to surface runoff around the mining complexes, it is essential to study treatments that improve water quality. Natural coagulants stand out as effective, low-cost, and environmentally safe alternatives to chemical coagulants. In this work the performance of Tanfloc and Moringa seed was evaluated, aiming at reducing water turbidity. Initially, parameters defined by Di Bernardo (2011) were adopted, in which the addition of different dosages of coagulants was established, with coagulation/flocculation time of 20 min and sedimentation time of 2 min. The best conditions observed were at pH 10,85 and 80,00 mg/L for Tanfloc, and pH 7,88 and 51,03 mg/L for Moringa seed, where both reduced 90% and 80% of the initial turbidity (2000 to 2500NTU), respectively. Also, to optimize the results, mathematical models were used to generate a response surface, aiming to obtain the most effective response between the combination of pH and dosage variables. The model chosen for this work was the Central Composite Rotational Design (DCCR). In general, the results obtained are promising and demonstrate a real possibility of substitution or the use of the same as auxiliaries of the industrial coagulants that are commonly used for such processes.

Key-words: Natural coagulants, Tanfloc, Moringa seed, Turbidity, Response Surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coagulante sendo aplicado na amostra com turbidez elevada. Fonte: (Reis, 2017).....	5
Figura 2 - Equipamento Jar Test. Fonte: De autoria própria.....	9
Figura 3 - Fluxograma resumido das etapas no trabalho. Fonte: De autoria própria.	10
Figura 4 - Aspecto da polpa após a preparação. Fonte: De autoria própria.	12
Figura 5 - A) Turbidímetro (HACH, 2100Q), B) Multiparâmetro (HACH, HQ40d), C) Reator estático de bancada Jar Test (LABOR ESTABILLE; JLDB- 9020- 0062). Fonte: De autoria própria.....	13
Figura 6 - Solução de Tanfloc com a concentração de 20%. Fonte: De autoria própria.	14
Figura 7 - Solução de semente de Moringa a 40%. Fonte: De autoria própria. ..	15
Figura 8 - Gráfico de dispersão relacionando a dosagem com a %redução de turbidez nas análises exploratórias.	18
Figura 9 - Jarros após a aplicação do coagulante a base de tanino. Fonte: De autoria própria.	19
Figura 10 - Gráficos relacionando redução de turbidez, dosagem e pH. Em que: A) Gráfico de contorno Redução da Turbidez (%) vs Dosagem e pH inicial. B) Gráfico de Terreno de Superfície de % redução vs Dosagem e pH inicial. Fonte: De autoria própria.	20
Figura 11 - Gráfico contendo os pontos ótimos do Tanfloc. Fonte: De autoria própria.	23
Figura 12 - Gráfico de dispersão relacionando a dosagem com a %redução de turbidez nas análises exploratórias. Fonte: De autoria própria.....	24

Figura 13 - Jarros após a aplicação do coagulante a base da semente de Moringa. Fonte: De autoria própria.	25
Figura 14 - Gráficos relacionando redução de turbidez, dosagem e pH. Em que: A) Gráfico de contorno Redução da Turbidez (%) vs Dosagem e pH inicial. B) Gráfico de Terreno de Superfície de % redução vs Dosagem e pH inicial. Fonte: De autoria própria.	26
Figura 15 - Gráfico contendo os pontos ótimos da semente de Moringa. Fonte: De autoria própria.	28

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.1.1	Objetivos Específicos	3
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Água na mineração	3
2.2	Turbidez	4
2.3	Processos para tratamento da água: coagulação, floculação e sedimentação	4
2.3.1	Coagulação	4
2.3.2	Floculação	5
2.3.3	Sedimentação	6
2.4	Influência do pH	6
2.5	Vantagens dos coagulantes naturais	6
2.6	Coagulantes biodegradáveis: Tanfloc e Semente de Moringa	7
2.6.1	Tanfloc	7
2.6.2	Semente de Moringa	8
2.7	Ensaio de tratabilidade da água: Jar Test	9
3	Materiais e métodos	10
3.1	Delineamento da pesquisa	10
3.2	Preparação da água sintética	10

3.3	Equipamentos.....	13
3.4	Preparação e determinação dos parâmetros para obtenção da melhor dosagem e pH do coagulante Tanfloc.....	13
3.5	Preparação e determinação dos parâmetros para obtenção da melhor dosagem e pH do coagulante de Semente de Moringa	14
3.6	Ensaio de Jar Test.....	15
3.7	Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).....	16
4	Resultados e discussão	18
4.1	Resultados e parâmetros obtidos utilizando o Tanfloc	18
4.2	Resultados e parâmetros obtidos utilizando a semente de Moringa.....	23
5	Conclusão	29
	REFERÊNCIAS	30
	Material Suplementar	34

1 INTRODUÇÃO

No mundo, a mineração é um dos setores que mais contribui para a economia, sendo uma atividade fundamental e, por isso, é importante que seja desenvolvida de forma sustentável (FARIAS, 2002). Segundo os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2022, o Brasil arrecadou com a produção mineral cerca de R\$ 250 bilhões e, deste valor, aproximadamente R\$ 100,5 bilhões foram provenientes das atividades minerárias no estado de Minas Gerais, ocupando assim o primeiro lugar entre os estados (ALVES, 2023).

Segundo Farias (2002), em Minas Gerais, um dos principais problemas gerados pela mineração de ferro é a poluição das águas superficiais. Essa poluição, além de outras consequências, gera uma elevada turbidez, que pode ser descrita como sendo a condição da água com quantidade excessiva de partículas em suspensão (DI BERNARDO, 2003). Desse modo, o aumento da turbidez dos rios por consequência dos materiais particulados oriundos das lavras e barragens de rejeito, são algumas das contribuições antrópicas que a mineração pode provocar nas bacias (RIPLEY *et al.*, 1996; ANA, 2006). Tendo isso em vista, essa turbidez se torna um problema pois, de acordo com a resolução Conama (357), o valor máximo permitido (VMP) para a turbidez em rios de água doce é de 40 UNT (unidade de turbidez).

Diante desse aspecto, essa água deve ser tratada e, para isso precisa passar por alguns processos, tais como o processo de coagulação, floculação e sedimentação, que tem como ponto chave a utilização de coagulantes e/ou floculantes (DI BERNARDO, 2008). Nesse cenário, no processo de coagulação as partículas coloidais são neutralizadas e aglutinadas em partículas de maiores dimensões (maior volume e maior peso), para que dessa forma possam formar flocos e sedimentar (CETESB, 2014). Nesta etapa é comum a utilização de coagulantes químicos.

Os coagulantes químicos mais utilizados no Brasil são a base de sais de ferro e alumínio, a utilização destes tem um baixo custo e uma boa eficácia para o tratamento da água (NÓBREGA SILVEIRA, ALVES BATISTA PEQUENO, *et al.* 1998). Os coagulantes químicos, em sua maioria, agem desestabilizando as partículas coloidais,

de modo que, as cargas negativas das partículas em suspensão são neutralizadas, atraindo os coágulos e formando partículas maiores (YUKIO KAMIWADA, VEGA ANDRADE e GONÇALVES DOS REIS, 2019). Entretanto a utilização dos coagulantes químicos tem desvantagens relevantes, sendo que a utilização do mesmo no tratamento de água, gera um lodo que contém resíduos químicos, o que o torna de difícil manuseio e tratabilidade, de modo que estes resíduos químicos podem acarretar malefícios para a saúde (DI BERNARDO e SANTOS., 2008).

Desta forma, visando a substituição dos coagulantes químicos, estuda-se a utilização de aditivos biodegradáveis, que são eficientes, diminuem ainda mais o custo do tratamento e geram uma menor quantidade de lodo quando comparado aos coagulantes químicos (CHENG, 2012). Estes estudos são executados por meio de ensaios e, tem como objetivo definir dosagens de melhor desempenho para o futuro tratamento da água, para isso, o equipamento mais utilizado em experimentos de coagulação realizados em laboratório é o *Jar Test* (ALMEIDA DE OLIVEIRA e BENVINDO DA LUZ, 2001).

O ensaio no Jar Test é executado em um equipamento que tem como estrutura motores elétricos, hastes e jarros, com o número de jarros podendo variar. O princípio do equipamento são os motores elétricos fazendo com que as hastes possam rotacionar, inclusive em diferentes velocidades, simulando fidedignamente o sistema operacional de estações de tratamento de águas e efluentes. Assim, o ensaio possibilita a definição de dosagens ótimas de aditivos como os coagulantes, e também a avaliação de variáveis físico-químicas, como o pH, a turbidez e a alcalinidade, no processo de tratamento (ABES, 2019). Deste modo, é de grande relevância o estudo por meio dos ensaios neste equipamento, para que se possa encontrar parâmetros otimizados que previnam a utilização de superdosagens de aditivos e proporcionem o menor custo no tratamento da água de elevada turbidez.

1.1 Objetivo

Realizar o estudo de otimização do tratamento de águas residuárias de mineração por meio de coagulantes naturais.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do pH e da dosagem do coagulante orgânico Tanfloc, no processo de clarificação da água.
- Avaliar a influência do pH e da dosagem do coagulante orgânico extrato de semente de Moringa, no processo de clarificação da água.
- Obter modelo matemático da remoção de turbidez em função do pH e concentrações dos coagulantes Tanfloc e extrato de semente de Moringa.
- Obter os pontos ótimos referentes aos parâmetros pH e concentrações dos coagulantes Tanfloc e extrato de semente de Moringa no tratamento da água residuária de mineração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Água na mineração

Em sua totalidade, de forma direta ou indireta, atividades econômicas demandam exploração de recursos naturais (LANA, 2015). No Brasil, no Quadrilátero ferrífero, a Província mineral de Carajás e a região de Corumbá, são as principais regiões da mineração de ferro (LANDIM DE CARVALHO, MACHADO DA SILVA, *et al.*, 2021). Além destas, a cidade de Ouro Preto – MG, sendo sede de implantação de minas de exploração mineral desde a colonização, também tem grande relevância neste cenário (LANA, 2015).

Neste cenário, como dito por Lana (2015), a atividade mineradora faz uso de recursos naturais, e um destes recursos utilizados é a água. Segundo Ciminelli (2016), a água está presente desde as etapas iniciais de produção até os processos finais de beneficiamento na mineração. Ademais, levando em consideração a água superficial proveniente destas atividades, a mesma apresenta alguns efeitos prejudiciais que são relacionados ao fenômeno de erosão e transporte, além dos químicos (MENDONÇA,

2012). Desse modo, caso esta água que traz em si uma quantidade elevada de partículas, atinja rios e lagos, poderão ocorrer negativos efeitos na turbidez, podendo até ocorrer o assoreamento do corpo receptor, havendo mudanças nos parâmetros de qualidade hídrica (RIPLEY *et al.*, 1996).

2.2 Turbidez

Define-se turbidez como sendo a propriedade física que é relacionada a redução ou perda de sua transparência, devido à grande presença de materiais em suspensão que dificultam a passagem de luz através deste fluido (MARIN-MORALES, MANTUANELLI ROBERTO *et al.* 2007). Os esgotos provenientes das indústrias e domicílios, bem como as atividades mineradoras, aumentam a turbidez da água (CETESB, 2014).

Em geral, a turbidez é um dos parâmetros físicos mais importantes para rejeição ou aceitação do tratamento para controle de qualidade da água (BERGAMIN, 2017). Na legislação brasileira, existem parâmetros estabelecidos para o nível de turbidez aceitável segundo resoluções, por isso as mineradoras preocupam-se com esse aspecto. De acordo a resolução do CONAMA (357), em águas doces de classe I, o limite aceitável de turbidez é de 40 UNT.

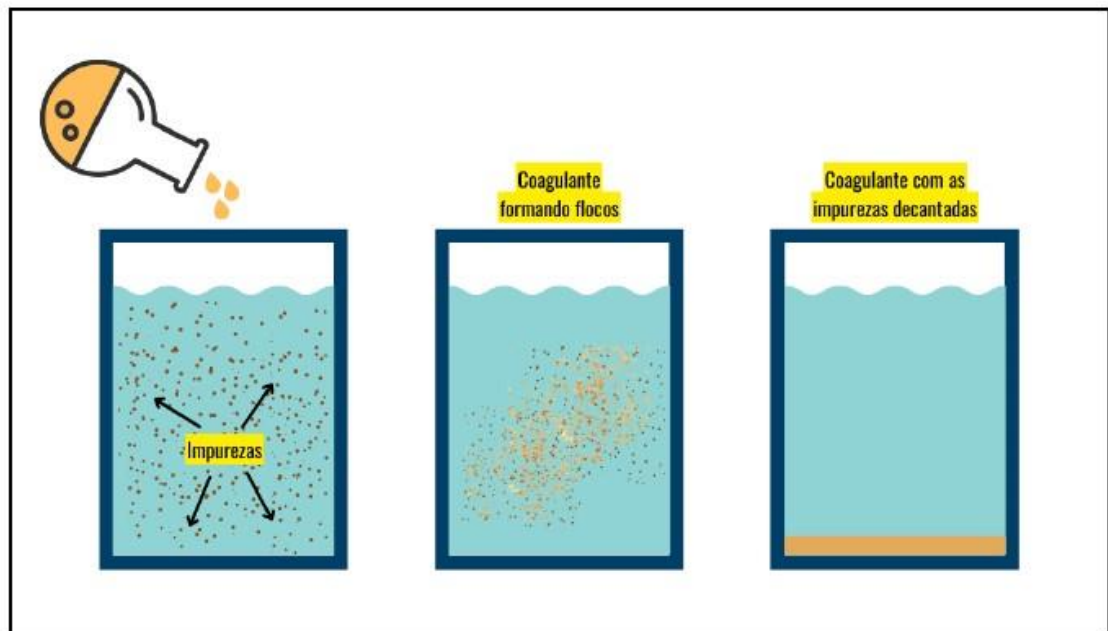
Dessa forma, com o intuito de obedecer a lei, faz-se necessário o estudo e desenvolvimento de alguns processos para o tratamento da água, de modo que, atenda aos atuais parâmetros estabelecidos pelos órgãos nacionais.

2.3 Processos para tratamento da água: coagulação, floculação e sedimentação

2.3.1 Coagulação

Pode-se definir coagulação, como sendo o processo de desestabilização de partículas coloidais ou a neutralização das moléculas que possam estar negativamente carregadas (REIS, 2017) - Figura 1.

Figura 1 - Coagulante sendo aplicado na amostra com turbidez elevada. Fonte: (Reis, 2017)



De acordo com Ritcher (2009), um dos principais equipamentos que auxiliam nos testes com tais coagulantes é o *Jar Test*, de modo que o coagulante é aplicado a amostra nos jarros e com a rotação o coagulante entra em ação tendo contato com o máximo de partículas presentes. Desse modo, a escolha dos coagulantes e suas respectivas dosagens é de fundamental importância para a eficácia do tratamento do efluente e também para que os processos subsequentes, como a floculação, obtenham sucesso (MARTINS, 2014).

2.3.2 Floculação

A floculação tem como princípio transformar em partículas coloidais (flocos), as impurezas que se encontram em suspensão (KONRADT-MORAES, 2009). E, segundo Leme (1982), a floculação é um processo que visa aglutinar as partículas sólidas coaguladas, por meio de um contato estabelecido entre elas e outras existentes na água, através de agitação. Portanto, o processo de floculação é de suma importância para que as partículas superficiais formem flocos, aumentem o peso e possam seguir para a próxima fase que é denominado sedimentação.

2.3.3 Sedimentação

A sedimentação tem como princípio a diferença de densidade entre a água e os sedimentos em suspensão (MEDEIROS, 2013). Ainda segundo Medeiros (2013), esse processo consiste na deposição no fundo deste material inicialmente suspenso, para posterior retirada do mesmo. Di Bernardo e Dantas (2015) definem sedimentação como sendo uma parte do processo de redução de sedimentos sólidos da água ou efluente que se trata.

Assim sendo, a sedimentação é um processo caracterizado por ser lento e posterior a coagulação e floculação. Por isso que, as etapas de coagulação e floculação citadas anteriormente, tem papel fundamental para que o processo de sedimentação seja o mais eficiente possível (MEDEIROS, 2013). Portanto, a sedimentação das partículas tem como finalidade contribuir para o sucesso na redução de turbidez do efluente tratado (RITCHER, 2009). Além destes processos, a eficiência de todas as fases também leva em consideração a influência de outros parâmetros, como o pH.

2.4 Influência do pH

O pH é o parâmetro que se utiliza para determinar a concentração de íons H⁺ no meio analisado. É um dos fatores importantes para determinar se a água está ácida ou alcalina. Além disso, o pH influencia significativamente nas reações químicas e bioquímicas (BERGAMIN, 2017).

Com relação ao pH ótimo para a eficiência da semente de Moringa como coagulante, o pH próximo da neutralidade é o ideal para seu efeito coagulante (SILVA FRANCO, ARCANJO BATISTA *et al.*, 2017). Os coagulantes a base de tanino, no caso do Tanfloc, mostram-se efetivos em uma faixa de pH de 4,5 – 8,0 (DA SILVA, 1999; BARRADAS, 2004). Com isso, são utilizados alguns tipos de coagulantes, sendo eles os químicos e os naturais.

2.5 Vantagens dos coagulantes naturais

Historicamente, para o processo de coagulação/floculação e tratamento da água, as indústrias utilizam coagulantes inorgânicos a base de ferro e alumínio (KONRADT-

MORAES, 2009). Entretanto, diversas pesquisas têm relatado problemas em função do seu uso, dentre eles: elevada toxicidade, e a geração de um elevado volume de lodo contendo o cátion Hidróxido de Alumínio dificultando sua disposição final (elevando o custo de aquisição e efeitos nocivos à saúde) (YIN, 2010; MONACO et al., 2010).

Desse modo, ao longo dos anos vem sendo realizados estudos para avaliações sobre a aplicação de coagulantes naturais no tratamento de efluentes (VAZ et al., 2010; SILVA et al., 2012; STROHER et al., 2013; SCHMITT et al., 2014; POZZOBON., 2015; KEMPKA, 2015). Estes estudos, vem obtendo resultados positivos e a utilização de coagulantes naturais tem demonstrado extensa vantagem quando comparado aos coagulantes químicos, levando-se em consideração à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodo, tornando-se a sua utilização em larga escala bastante promissora (YIN et al., 2010).

2.6 Coagulantes biodegradáveis: Tanfloc e Semente de Moringa

2.6.1 Tanfloc

O coagulante denominado Tanfloc, é um derivado da Acácia Negra produzido pela empresa TANAC que fica sediada no Estado do Rio Grande do Sul (GUSMÃO e SOARES, 2014). Este coagulante que tem como base o Tanino, segundo Barradas (2004), tem como características ser um coagulante orgânico e biodegradável de origem vegetal. No Brasil, há uma grande concentração de árvores tanantes, (Silva, 1999), mas ainda são poucas empresas que utilizam do tânico para fabricar produtos para o tratamento de água potável e residual.

Os Taninos têm sua estrutura formada por moléculas fenólicas biodegradáveis, com grande capacidade de aglutinar a proteínas e formar macromoléculas com minerais, segundo Castro-Silva et al. (2004), sendo eficiente na remoção de partículas presentes na água. Os estudos feitos por Ferrari (2015) demonstram que o uso do Tanfloc foi significativamente mais eficiente que o uso dos coagulantes químicos no tratamento de efluente de indústria frigorífica, além disso, tem-se também a vantagem de não apresentar metais remanescentes na água tratada e no lodo gerado.

Em estudo feito por Siqueira et al. (2018) e Eguchi e Arantes (2019), comparando o coagulante natural Tanfloc e o coagulante químico, a eficiência na redução da turbidez foi similar, enquanto o coagulante químico obteve aproximadamente 85% de redução, o Tanfloc obteve próximo de 87,9%, evidenciando o potencial coagulador dessa substância.

2.6.2 Semente de Moringa

A *Moringa oleífera* é uma árvore tropical com funções medicinais e alimentícias (folhas e frutos), suas sementes têm grande utilização no Nordeste brasileiro com a finalidade de clarificar a água (SILVA FRANCO, ARCANJO BATISTA *et al.*, 2017). Com tal característica, a aplicabilidade da semente de *Moringa oleífera* tem sido objeto de estudo de vários cientistas como Muyibi & Evison (1995a, b), Ndabigengesere et al. (1995). Há alguns anos, foi descoberto que a utilização da semente de *Moringa* triturada, com o custo bem mais baixo quando comparado-se ao tratamento químico, pode ser uma alternativa de tratamento de efluentes de grande relevância (PATERNIANI, MONTAVANI e SANT'ANNA, 2009).

Os mecanismos de coagulação da *Moringa Oleífera* foi objeto de estudo dos pesquisadores Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995), com o intuito de entender as propriedades coagulantes da planta. De todo estudo, concluiu-se que apenas as sementes tinham propriedades coagulantes e, de modo que apenas no estado aquoso, apresentavam atividade coagulante. Com isso, baseado no estudo feito, os autores relacionaram a presença de proteínas catiônicas hidrossolúveis presentes nas sementes, como sendo responsável pela sua ação coagulante (NDABIGENGESERE, TALBOT, 1995).

Santos et al. (2007), comparou o extrato de sementes de *Moringa* com os coagulantes químicos mais utilizados, obtiveram 80% de remoção de turbidez e pontuaram que, além da boa eficácia, o pH do efluente tratado não sofreu grande alteração, além disso também, diferentemente dos coagulantes químicos, não foi gerado grande volume de lodo no processo. Estes resultados reforçam aqueles apresentados por Abdulsalam et al. (2007), os quais utilizaram as sementes de *Moringa* em forma de extrato na clarificação de águas brutas na Nigéria, obtendo-se

uma eficiência de remoção da turbidez de 82,4%, reforçando a ideia de que a Moringa pode substituir o sulfato de alumínio em razão do custo-eficácia, baixa agressão ao meio ambiente, e da facilidade de ser encontrado em diversas localidades.

2.7 Ensaio de tratabilidade da água: Jar Test

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2015) e Libanio (2008), diversos ensaios de tratabilidade da água, fazem com que seja possível definir parâmetros como, a dosagem ótima de produtos (coagulante e floculante), bem como as melhores faixas de pH de acordo com o produto utilizado. Ainda de acordo com os autores, é possível definir parâmetros como o gradiente de mistura lenta, mistura rápida e a velocidade de sedimentação.

Um dos ensaios que possibilitam a avaliação destes parâmetros, é o Jar Test - Figura 2. Este equipamento consiste em uma base sobre a qual colocam-se jarros, com hastes para que possa agitar o fluido (água) de forma magnética ou mecanizada (DEGANI-VADUZ, 2022).

Figura 2 - Equipamento Jar Test. Fonte: De autoria própria.



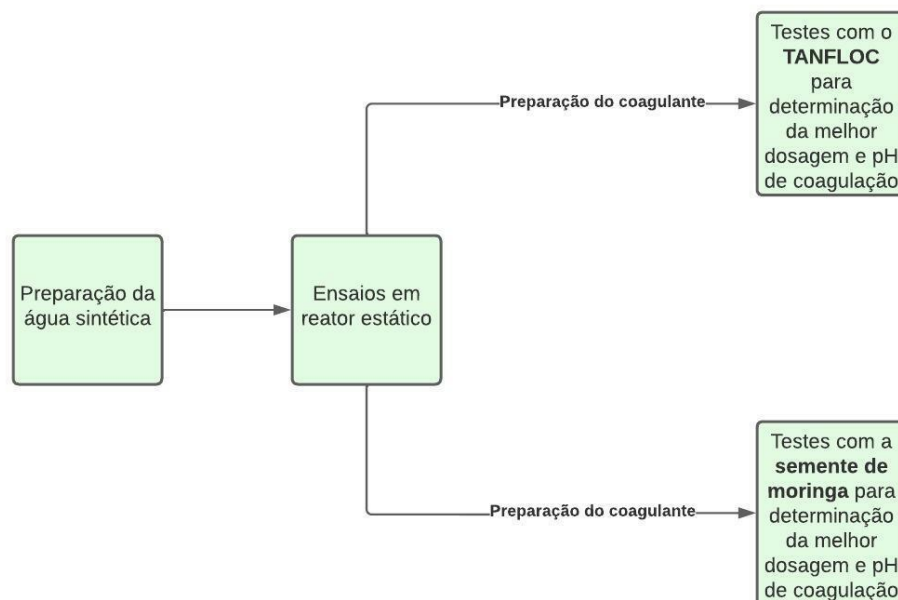
O Jar Test é um dos equipamentos mais utilizados quando se trata de testar cenários na tratabilidade da água e grande empresas do ramo utilizam este equipamento (CHENG, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento da pesquisa

Neste tópico são apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para realização do presente trabalho. Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), anexo a Escola de Minas, localizado na Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, em Minas Gerais. O fluxograma a seguir representa a etapas do experimento - Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma resumido das etapas no trabalho. Fonte: De autoria própria.



3.2 Preparação da água sintética

Foi realizada a preparação da água sintética para os testes de tratabilidade, a partir da mistura de material sólido processado e água, seguindo a metodologia de Santos (2021). No presente estudo, a água utilizada para preparação da água sintética, foi coletada do rio Piracicaba, nas proximidades da Mina Timbopeba na cidade de Ouro Preto – MG, coordenadas -20°14'05,132"S -43°30'18,807"W – Figura 4.

A água coletada foi armazenada em reservatórios de polietileno de 5m³, na área externa ao LSA. Análises dos parâmetros físico-químicos da água foram realizadas, sendo eles apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e métodos na análise da água coletada.

Parâmetros	Resultados	Métodos
Alcalinidade	11,55 mgL ⁻¹	Titulação em bancada
Turbidez	8,98 NTU	Turbidímetro portátil HACH
pH	7,94	Sonda Multiparâmetros HACH
Temperatura	21,3 °C	Sonda Multiparâmetros HACH
Oxigênio Dissolvido (OD)	7,96 mgL ⁻¹	Sonda Multiparâmetros HACH
Sólidos Totais (ST)	0,004 g	Calcinação
Condutividade Elétrica	106,4 uS	Condutivímetro de bancada DIGIMED
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	0,93 mgL ⁻¹	Oxigênio Dissolvido
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	12,38 mgL ⁻¹	Colorimetria

Desta forma, com o objetivo de preparar a água sintética na faixa da turbidez com predominância de coloides, foram feitas algumas alterações na metodologia proposta por Santos (2021). O material sólido (canga) utilizado é proveniente do município de Sabará – MG, coordenadas 20° 1'15.00" S 43°42'18.00" O e foram coletadas e encaminhadas para o Laboratório LSA.

Inicialmente, a amostra foi submetida ao peneiramento a seco, sendo coletada somente as partículas cuja granulometria foi inferior a 60 *mesh*. Em seguida, submeteu-se o material passante na malha de 60 *mesh* a moagem a úmido, no qual o fator de enchimento do moinho estabelecido foi de 50%, nos quais 20% deste são esferas de aço utilizadas como corpos moedores, 20% de material a ser moído e 10% de água. O material foi moído por 60 minutos, de modo a garantir que se enquadrasse dentro da granulometria pretendida. Em seguida, submeteu-se o material moído ao peneiramento a úmido, garantindo assim que a polpa a ser trabalhada fosse composta por partículas inferiores a 400 *mesh*. Por fim, foi finalizado o peneiramento no momento em que a água apresentou uma aparência límpida e tendo como resultado final uma polpa na qual todas as partículas possuem granulometria abaixo de 400 *mesh*. Na Figura 4 é apresentada a polpa após os procedimentos.

Figura 4 - Aspecto da polpa após a preparação. Fonte: De autoria própria.



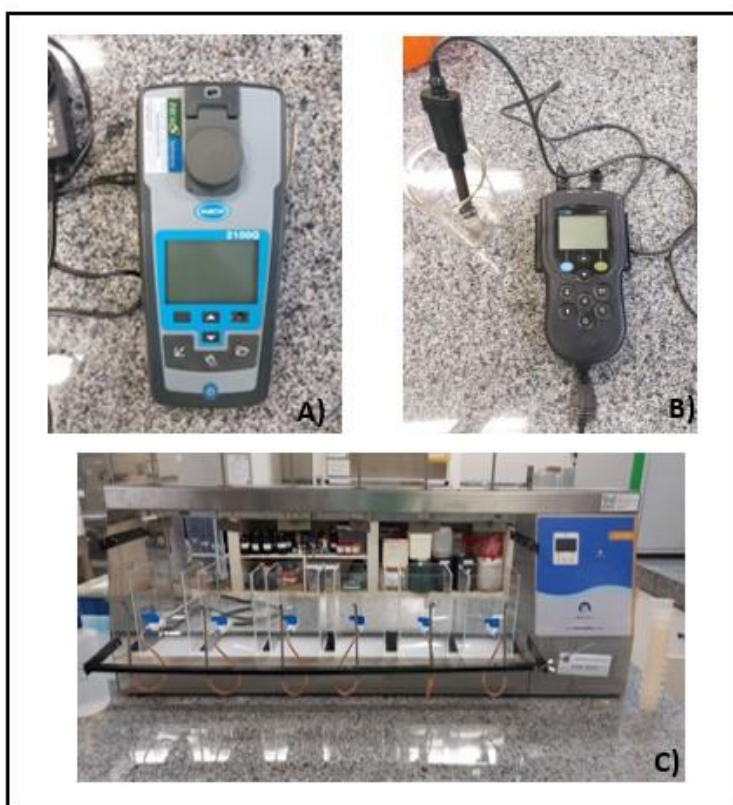
A preparação da água sintética foi realizada a partir da dispersão do material diluído mais concentrado na polpa proveniente do material cominuído em água, até a obtenção da turbidez entre 2000 e 2500 NTU (SANTOS, 2021). O material sólido processado foi adicionado aos poucos, sob agitação manual constante e a turbidez foi

aferida periodicamente e previamente aos ensaios, para evitar a sedimentação natural no fundo do recipiente.

3.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios são apresentados a seguir:

Figura 5 - A) Turbidímetro (HACH, 2100Q), B) Multiparâmetro (HACH, HQ40d), C) Reator estático de bancada Jar Test (LABOR ESTABILLE; JLDB- 9020- 0062). Fonte: De autoria própria.



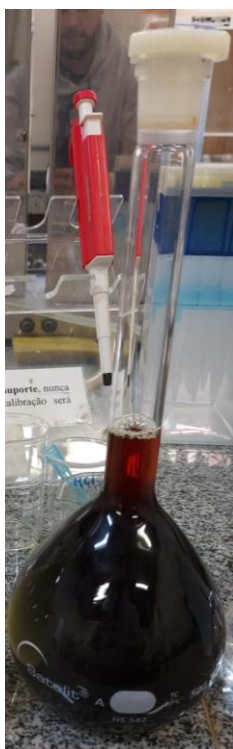
- Equipamentos diversos como: Cronômetro digital e diversas vidrarias para preparo e armazenamento de amostras (béqueres, balões volumétricos, vidro de relógio, provetas.).

3.4 Preparação e determinação dos parâmetros para obtenção da melhor dosagem e pH do coagulante Tanfloc

Os ensaios foram realizados com o objetivo de determinar a melhor dosagem e o melhor pH de coagulação do Tanfloc. O coagulante foi utilizado em pó e a para o

preparo da solução, foram utilizadas 10g de Tanfloc em 500 mL de água destilada, obtendo uma solução final com concentração de 20%. Diferentes dosagens dessa solução foram utilizadas para o teste de coagulação. Na Figura 6, observa-se o aspecto final da solução de Tanfloc.

Figura 6 - Solução de Tanfloc com a concentração de 20%. Fonte: De autoria própria.



3.5 Preparação e determinação dos parâmetros para obtenção da melhor dosagem e pH do coagulante de Semente de Moringa

O ensaio foi realizado com o objetivo de determinar a melhor dosagem e o melhor pH de coagulação da Semente de Moringa. A Moringa foi adquirida em sementes previamente secas, seguidas da trituração sem a casca, em liquidificador. A semente triturada passou por processo de peneiramento para a obtenção de menores frações, e em seguida pesou-se 20 g em uma balança e, dilui-se em 500 ml de água destilada, obtendo 40% de concentração. A solução permaneceu em agitação magnética por 30 minutos, e posteriormente passou pelo processo de filtração à vácuo em membrana de celulose de 45 μ m. Na Figura 7, observa-se o aspecto final da solução coagulante, totalmente dissolvida.

Figura 7 - Solução de semente de Moringa a 40%. Fonte: De autoria própria.



3.6 Ensaio de Jar Test

Os ensaios de Jar Test foram realizados a fim de verificar a eficiência das soluções coagulantes de Tanfloc e Moringa, na redução da turbidez da água residuária sintética de mineração.

O valor de turbidez da água utilizada nos testes variou entre 2000 e 2500 NTU. Para a realização do teste, a temperatura do efluente foi ajustada em 23°C e posteriormente foram transferidos 2 litros do efluente para cada jarro do Jar Test. Previamente, as medidas de pH, turbidez inicial e temperatura foram aferidas. Quando necessário, para correção do pH, foram utilizados o Ácido Clorídrico (10%) e o Hidróxido de Sódio (10%), para a obtenção do pH ideal para cada teste.

As amostras no Jar Test foram agitadas à 600 rpm, durante o preparo das dosagens. Essas, por sua vez, foram medidas e acondicionadas nas cubetas auxiliares do equipamento em questão. As dosagens utilizadas foram entre 10mg/L e 60mg/L e a variação do pH ocorreu nas faixas entre 7 e 11.

O protocolo de operação do Jar Test adotado foi de agitação por 5 segundos após a adição dos coagulantes, a 600rpm. Após esse intervalo, a velocidade média da agitação foi reduzida a 50 rpm, mantida por 20 minutos. Em seguida, a agitação foi

desligada e a amostra permaneceu em repouso por 2 minutos para a sedimentação. Durante esse período de 2 minutos, exatamente em 1min e 53s foi iniciado o período de coleta, onde os 5s iniciais são descartados e a coleta ocorre posterior a esse período, por mais 5s. Após a coleta, análises de turbidez e pH foram realizadas.

3.7 Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é utilizada em larga escala para otimizar processos, utilizando técnicas de estatística e matemática para chegar em resultados de grande relevância (COMPARINI, 2003). A utilização de MSR com o intuito de otimizar projetos experimentais baseia-se na construção de modelos matemáticos empíricos que, em sua maioria, empregam funções polinomiais lineares ou quadráticas para descrever o sistema em estudo (TEÓFILO e FERREIRA, 2006). O modelo escolhido para este trabalho foi o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) que foi criada por Box e Wilson em 1951.

Inicialmente, foram executadas análises exploratórias utilizando a metodologia de Di Bernardo (2011). Os valores de concentração dos coagulantes e pH foram obtidos por meio de revisão bibliográfica. As faixas testadas foram, entre 0,0 e 40,0 para o Tanfloc e 0,0 e 40,0 para a Moringa.

Após a análise exploratória, com o auxílio de softwares, como o *Statgraphics Centurion XVI.II*, *MINITAB*, os valores de pH e dosagem dos coagulantes encontrados foram utilizados para definir os pontos centrais e axiais do DCCR.

O número de experimentos no DCCR, caso seja empregado um fatorial completo é dado pela expressão $2k + 2k + Pc$, onde k é o número de fatores e Pc o número de repetições no ponto central. O valor de α varia conforme o número de fatores a ser testado. A seguir, a equação 1 utilizada para a construção do MSR descritas por Muniz (2018), em que o número de fatores é igual a 2.

$$\alpha = (2^k)^{1/4} = 1,414 \quad (1)$$

Na Tabela 2 está indicado o arranjo utilizado no DCCR. Os valores foram determinados a partir da análise exploratória, de modo que os pontos axiais ($-\alpha$ e $+\alpha$) corresponderem a faixa a ser analisada.

Tabela 2 – Níveis codificados e reais das variáveis independentes no DCCR

Variáveis independentes	Níveis codificados e reais das variáveis independentes				
	-1,414	-1	0	1	+1,414
pH	4,38	5,00	6,50	8,00	8,62
Dose (mg L ⁻¹)	0,00	5,86	20,00	34,14	40,00

Utilizando esta equação, foram definidos os parâmetros otimizados para a execução das análises, apresentados na Tabela 3. Com isso, foram definidos 13 testes a serem feitos em sequência no Jar Test, variando cada um a concentração e o pH do Tanfloc e do extrato semente de Moringa.

Tabela 3 – Parâmetros de dosagem e pH utilizados nos testes com Tanfloc e a semente de Moringa

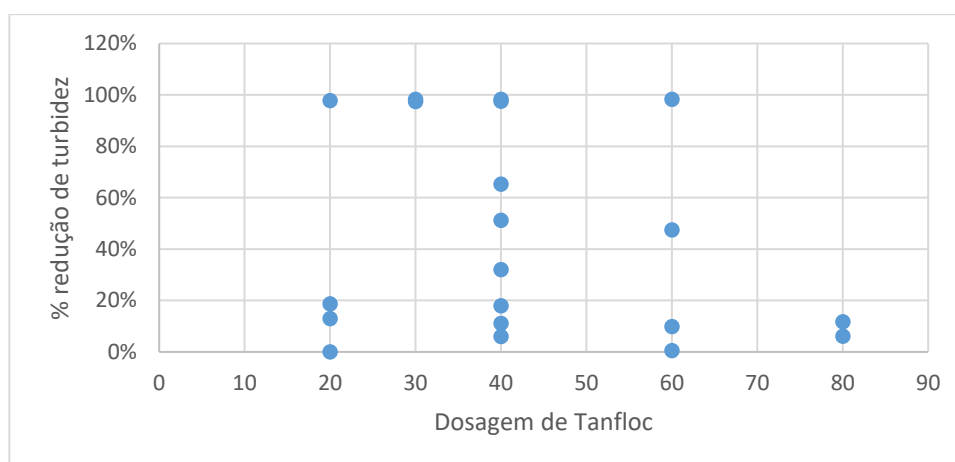
pH - Tanfloc	Dosagem – Tanfloc (mg/L)	pH-Moringa	Dosagem-Moringa (mg/L)
6,00	40,00	6,00	40,00
6,73	11,72	6,73	11,72
6,73	68,28	6,73	68,28
8,50	0,00	8,50	0,00
8,50	40,00	8,50	40,00
8,50	40,00	8,50	40,00
8,50	40,00	8,50	40,00
8,50	40,00	8,50	40,00
8,50	40,00	8,50	40,00
8,50	80,00	8,50	80,00
10,27	11,72	10,27	5,86
10,27	68,28	10,27	68,28
11,00	40,00	11,00	40,00

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados e parâmetros obtidos utilizando o Tanfloc

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a metodologia e parâmetros do Di Bernardo (2011) descritos no item 4.6. Com isso, os dados e resultados obtidos nos testes para definição das melhores dosagens, são apresentados a seguir (Figura 8).

Figura 8 - Gráfico de dispersão relacionando a dosagem com a %redução de turbidez nas análises exploratórias.



Os dados são apresentados na íntegra no material suplementar e, as combinações ótimas de dosagem e pH, serviram de embasamento para a definição dos parâmetros utilizando a análise DCCR. Seguindo esses parâmetros, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.

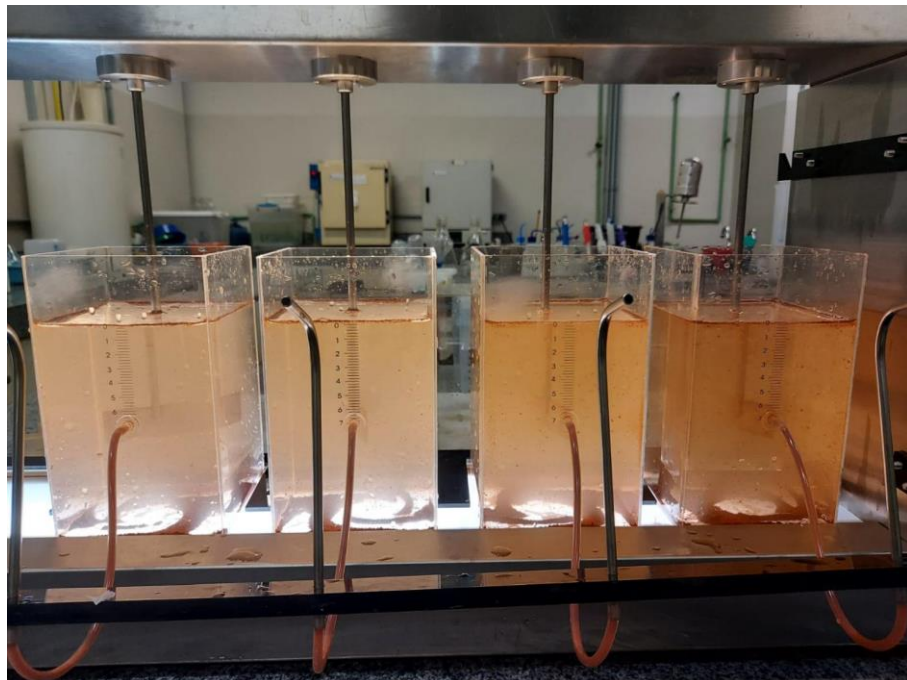
Tabela 4 – Resultados obtidos após análises utilizando os parâmetros otimizados.

pH - Tanfloc	Dosagem - Tanfloc	pH final	Turb. Inicial	Turb. Final	%Red
6,00	40,00	7,26	2250	1090	51,56%
6,73	11,72	8,14	2310	805	65,15%
6,73	68,28	6,87	2280	1350	40,79%
8,50	40,00	7,44	2650	1420	46,42%
8,50	40,00	7,57	2480	1205	51,41%
8,50	40,00	7,37	2490	1152	53,73%

8,50	80,00	6,96	2370	800	66,24%
8,50	40,00	7,05	2190	1140	47,95%
8,50	40,00	7,10	2310	1040	54,98%
8,50	0,00	-	-	-	-
10,27	11,72	7,75	2495	955	61,72%
10,27	68,28	7,15	2210	395	82,13%
11,00	40,00	8,77	2520	237	90,60%

Na Figura 9 foram apresentados os jarros após a aplicação do coagulante a base de tanino.

Figura 9 - Jarros após a aplicação do coagulante a base de tanino. Fonte: De própria autoria.

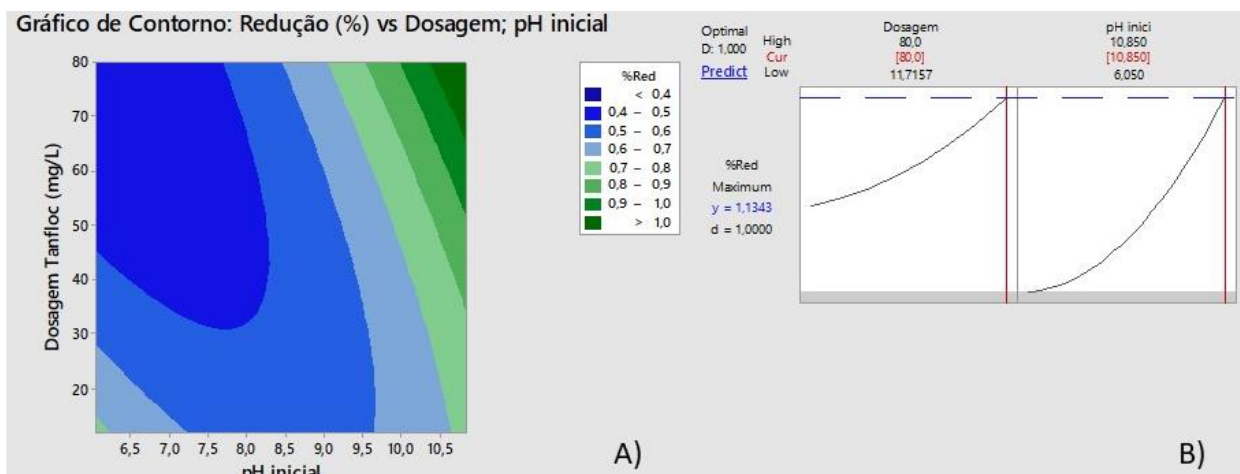


Observa-se que, na utilização do Tanfloc, a condição ótima encontrada foi de 80,0 mg/L para concentração do coagulante, em pH 10,85, atingindo uma redução da turbidez de, aproximadamente, 90%. Nos testes realizados por Moraes (2009), em água ainda sem tratamento de uma estação de tratamento em Maringá, foram constatadas porcentagens de redução de turbidez entre 95 e 98%, utilizando a concentração próxima a 40mg/L de Tanfloc. Os outros autores como Siqueira et al.

(2018) e Eguchi e Arantes (2019), observaram uma redução de turbidez de 87,9% utilizando o Tanfloc, em água bruta de estações de tratamento. Ainda, comparando estes resultados com os alcançados utilizando o sulfato de alumínio, um dos coagulantes químicos mais utilizados, foi encontrado que a melhor concentração para a redução de turbidez foi para dosagens acima de 15mg/L, tendo uma eficiência de até 98% (MORAES, 2009). Com isso, pode-se observar que, ambos apresentam boa eficiência mas, quando se leva em consideração o menor custo de utilização dos coagulantes naturais, juntamente com as desvantagem da utilização de coagulantes químicos, como resíduos químicos pós tratamento, elevada toxicidade ambiental e outros malefícios a saúde, conclui-se que a utilização de coagulantes biodegradáveis é a mais viável.

A partir destes resultados obtidos, foram elaborados os gráficos de superfície resposta, pelo método DCCR (Figura 10).

Figura 10 - Gráficos relacionando redução de turbidez, dosagem e pH. Em que: A) Gráfico de contorno Redução da Turbidez (%) vs Dosagem e pH inicial. B) Gráfico de Terreno de Superfície de % redução vs Dosagem e pH inicial. Fonte: De autoria própria.



A título de comparação, foram construídos os gráficos A e B que relacionam a redução de turbidez em função do pH e a dosagem de coagulante, de modo que permitem a avaliação quantitativa do comportamento do sistema (Figura 10). Com a análise dos gráficos, percebe-se que a região mais eficiente é assinalada de verde escuro no gráfico A. Desse modo, os resultados indicam que a faixa ótima de pH e a

dosagem ótima que teve a melhor redução de turbidez foi de 80,0mg/L e pH acima de 10,85, alcançando uma redução superior a 90%.

O gráfico B reforça o resultado anterior indicado no gráfico A (Figura 10). Além disso, pode-se observar também que a medida que o pH aumenta tornando-se mais básico, constata-se melhores eficiências na redução de turbidez, na dosagem de 80mg/L. Em contrapartida, observa-se que a redução das dosagens do Tanfloc, ocasiona na redução da eficiência do tratamento, com menor porcentagem de redução da turbidez.

Relacionando estes resultados com os resultados encontrados na literatura, os mesmos divergem dos resultados que Da Silva (1999) e Barradas (2004) encontraram, no que tange o pH, em que pressupõem que a faixa ótima de pH do composto a base de tanino é de 4,5 – 8,0, com relação a dosagem, os resultados foram similares.

A partir da superfície resposta, obteve-se o modelo matemático que relaciona a redução de turbidez em percentuais com os parâmetros pH e dosagem de Tanfloc. Conforme disposto na equação 2 a seguir:

$$\begin{aligned} \%Red = & 2,908 - 0,02341 \text{ Dosagem} - 0,520 \text{ pH inicial} + 0,000057 \text{ Dosagem} * \text{Dosagem} \\ & + 0,02926 \text{ pH inicial} * \text{pH inicial} + 0,002225 \text{ Dosagem} * \text{pH inicial} \end{aligned} \quad (2)$$

Na Tabela 5 foi apresentado o P valor.

Tabela 5 – Análise do P valor

Efeito dos fatores na remoção de Turbidez	P valor
Modelo	0,004
pH inicial	0,002
Dosagem	0,961

pH inicial*pH inicial	0,010
pH inicial*Dosagem	0,010

Ao analisar a Tabela 5, observa-se que o único parâmetro que não tem significância ao nível de 5% ($p > 0,05$), é o parâmetro dosagem. Os demais valores são significativos na remoção de turbidez ao nível 5%. Na Tabela 6 foi apresentada a avaliação dos valores de R.

Tabela 6 – Análise dos valores de R.

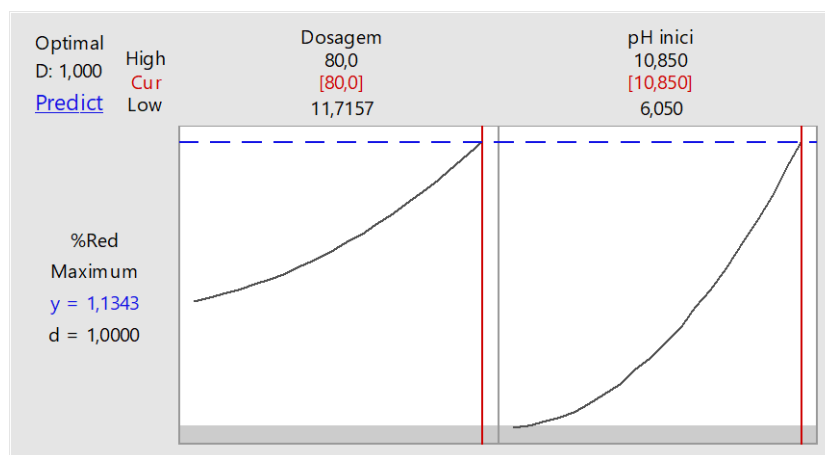
S	R = sq	R =sq (adj)	R = sq (pred)
0,0592134	91,23%	83,92%	6,51%

Analisando-se a Tabela 6, pode-se dizer que quanto menor o valor de S, melhor será a resposta descrita pelo modelo, sendo menor desvio padrão tendo um melhor ajuste ao modelo matemático. Observa-se também que, o valor de R = sq (R^2) que é o coeficiente de correlação (91,23%), indica que apenas 8,77% da variação total não pode ser explicada pelo modelo empírico de DCCR. De acordo com Olmez (2009), quanto mais próximo o R^2 de 100%, melhor será o modelo e menor será o erro. Ainda segundo o autor, modelos com valores de R^2 maior que 0,80 (80,0%) são mais confiáveis para fins preditivos. Com relação ao R^2 (adj), espera-se valores maiores, pois dessa forma o modelo consegue explicar maior variação nas respostas. Da mesma forma, o R^2 (pred) se refere ao potencial do modelo de explicar novas observações e por se tratar de uma equação de muitas variáveis se espera valores reduzidos.

O gráfico da Figura 11, apresenta os pontos ótimos dos parâmetros avaliados, que indicam, com precisão, a dosagem e pH ótimos de 80,0mg/L e 10,85, respectivamente. Já os resultados de menor eficiência encontram-se na faixa de pH

abaixo de 6,50 e dosagem acima de 35,0mg/L/L, obtendo uma redução de 40,79%, observado na Tabela 4.

Figura 11 - Gráfico contendo os pontos ótimos do Tanfloc. Fonte: De autoria própria.

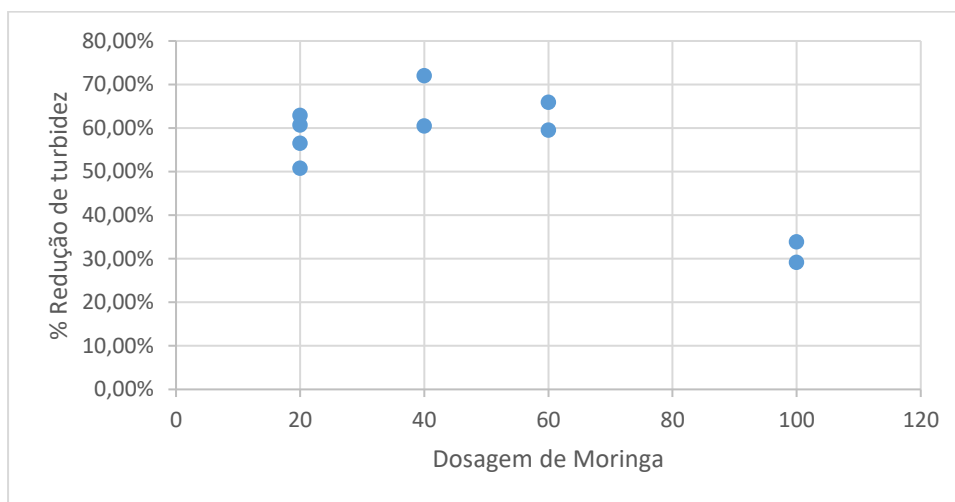


Observa-se ainda, que o ponto ótimo (destacado em vermelho) coincide com o ponto máximo. Entretanto, não foi observado o decaimento das curvas, indicando a necessidade de análises que extrapolem a amplitude de dados avaliados nessa pesquisa. Assim, sugere-se que estudos futuros explorem valores superiores aos apresentados neste trabalho.

4.2 Resultados e parâmetros obtidos utilizando a semente de Moringa

Para a realização dos ensaios, foi empregada a mesma metodologia utilizada para o Tanfloc, segundo Di Bernardo (2011), descritos no item 4.6. Com isso, os dados e resultados obtidos nos testes para definição das melhores dosagens são apresentados a seguir (Figura 12).

Figura 12 - Gráfico de dispersão relacionando a dosagem com a %redução de turbidez nas análises exploratórias. Fonte: De autoria própria.



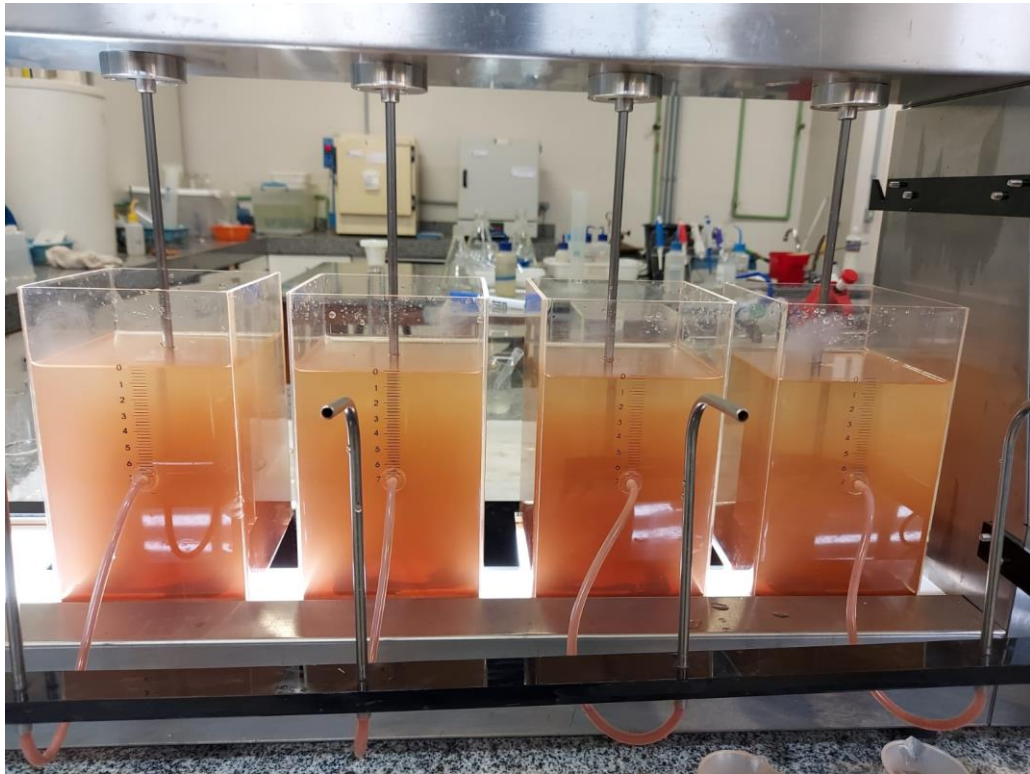
Os dados são apresentados na íntegra no material suplementar. Após as análises para a definição das condições ótimas de dosagem e pH, da solução de Moringa, foram definidos parâmetros otimizados para outras análises utilizando o DCCR, conforme os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos após análises utilizando os parâmetros otimizados.

pH - Moringa	Dosagem - Moringa	pH final	Turb. Inicial	Turb. Final	%Red
6,00	40,00	6,23	2280	907	60,22%
6,73	68,28	8,77	2400	715	70,21%
6,73	11,72	8,07	2205	775	64,85%
8,50	40,00	8,27	2240	605	72,99%
8,50	40,00	7,92	2290	424	81,48%
8,50	40,00	7,10	2310	702	69,61%
8,50	40,00	7,17	2380	690	71,01%
8,50	40,00	8,72	2457	562	77,13%
8,50	0,00	-	-	-	
8,50	80,00	8,2	2297	727	68,35%
10,27	68,28	8,49	2370	1090	54,01%
10,27	11,72	9,86	2530	1995	21,15%
11,00	40,00	9,87	2360	1256	46,78%

Na Figura 13 foram apresentados os jarros após o teste com a Moringa.

Figura 13 - Jarros após a aplicação do coagulante a base da semente de Moringa. Fonte: De autoria própria.

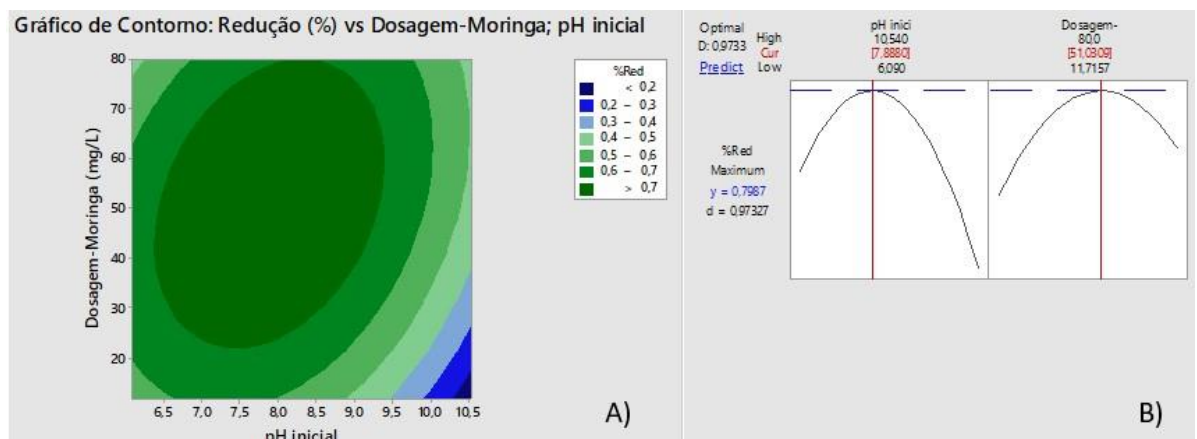


As condições ótimas encontradas utilizando a semente de Moringa, foram de 51,03mg/L de concentração da solução coagulante em pH 7,88, atingindo uma redução da turbidez de, aproximadamente, 80%. Nos testes realizados por Silveira (2021), a dosagem ótima encontrada foi de 80mg/L em pH ótimo de 7,81, onde foi obtida a redução próxima de 98%, tendo como turbidez inicial 21,30 NTU, indicando um melhor resultado utilizando uma maior dosagem com o pH próximo ao definido no presente trabalho. Comparando estes resultados com os resultados obtidos por Di Bernardo (2005), em que se atingiu uma redução de turbidez de 83,7%, com uma turbidez inicial na faixa de 150 a 250 NTU, utilizando o sulfato de alumínio ele explica que, em condições de alta turbidez, e utilizando baixa dosagem de sulfato de alumínio, ocorre a formação de pequenos flocos de baixa densidade, somente há formação de flocos maiores e mais densos em altas dosagens. Outro ponto levantado pelo autor é que a utilização do sulfato de alumínio, em determinada situação pode ocasionar a

acidificação do meio, porém, em concordância com o observado nesse estudo, o mesmo não acontece com a solução de Moringa, pois a mesma pouco altera o pH inicial da água (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Portanto, para se obter uma eficiência semelhante a obtida pela utilização da semente de Moringa, aplicam-se concentrações mais elevadas para ensaios com coagulantes químicos, como o caso do sulfato de alumínio. Desse modo, a utilização do coagulante natural a base de semente de Moringa torna-se mais vantajosa, considerando a redução de possíveis impactos ambientais, menor custo e eficiência semelhante do tratamento.

A partir destes resultados obtidos com a semente de Moringa, foram elaborados os gráficos pelo método de superfície resposta (DCCR) (Figura 14).

Figura 14 - Gráficos relacionando redução de turbidez, dosagem e pH. Em que: A) Gráfico de contorno Redução da Turbidez (%) vs Dosagem e pH inicial. B) Gráfico de Terreno de Superfície de % redução vs Dosagem e pH inicial. Fonte: De autoria própria.



Os gráficos A e B (Figura 14) relacionam a porcentagem de redução de turbidez em função do pH e a dosagem de coagulante (solução de semente de Moringa), permitindo a avaliação quantitativa do comportamento do sistema. Observa-se que a região em verde escuro, no gráfico A, indica que o pH e a dosagem ótimas resultantes da melhor redução de turbidez, correspondem a 51,03mg/L e pH de 7,88, atingindo 80% de redução. A cor azul escuro, indica a região de menor eficiência na redução de turbidez, com pH aproximado em 10,5 e dosagem inferior a 10mg/L, resultando em valores de redução inferiores a 20%. Na região central do gráfico B, em rede, pode-

se observar uma redução eficiente da turbidez, em pH próximo a 8,0 e a dosagem entre 15 a 40mg/L da solução de Moringa.

Os resultados obtidos em pH 7,88, próximo a neutralidade, consolidam os estudos de Franco e Arcanjo (2017), onde, segundo os autores, a ação coagulante da semente de Moringa é mais efetiva em pH próximo ao neutro. Dessa forma, a redução de turbidez alcançada foi bem próxima a obtida por Santos et al. (2007), obtendo uma redução de 80% em pH próximo a neutralidade e turbidez inicial na faixa de 100 NTU.

A partir da análise de superfície resposta, obteve-se o modelo matemático que relaciona a redução de turbidez, em percentuais, com os parâmetros pH e dosagem da semente de Moringa. Conforme disposto na equação a seguir:

$$\begin{aligned} \%Red = & -1,877 + 0,667 \text{ pH inicial} + 0,00191 \text{ Dosagem-Moringa} - 0,04678 \text{ pH inicial} \cdot \text{pH inicial} \\ & - 0,000127 \text{ Dosagem-Moringa} \cdot \text{Dosagem-Moringa} + 0,001394 \text{ pH inicial} \cdot \text{Dosagem-Moringa} \end{aligned} \quad (3)$$

Na Tabela 8 foi apresentada a avaliação do p valor.

Tabela 8 - Análise do P valor.

Efeito dos fatores na remoção de Turbidez	P valor
Modelo	0,002
pH inicial	0,005
Dosagem	0,014
pH inicial*pH inicial	0,002
pH inicial*Dosagem	0,065

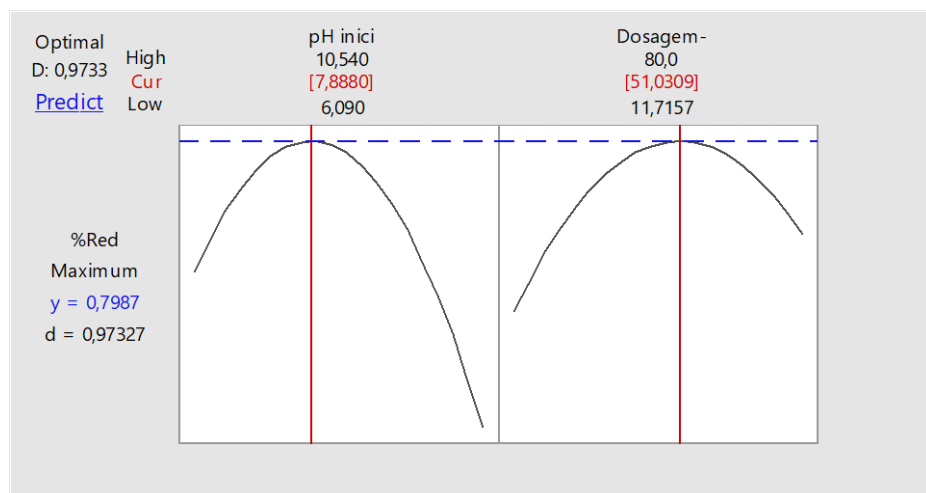
Ao analisar a Tabela 8, observa-se que análise do pH inicial*Dosagem não tem significância ao nível de 5% ($p > 0,05$). Os demais valores são significativos na redução de turbidez ao nível 5%. Na Tabela 9 foi apresentada a avaliação dos valores do R.

Tabela 9 - Análise dos valores de R.

S	R = sq	R =sq (adj)	R = sq (pred)
0,0603695	92,55%	86,35%	9,07%

De acordo com os dados da Tabela 9, pode-se dizer que quanto menor o valor de S, melhor será a resposta descrita pelo modelo, sendo menor desvio padrão, conferindo melhor ajuste ao modelo matemático. Observa-se também que, o valor de R = sq (R^2) que é o coeficiente de correlação, indica que apenas 7,45% da variação total não pode ser explicada pelo modelo empírico de DCCR. De acordo com Olmez (2009), quanto mais próximo o R^2 de 100%, melhor será o modelo e menor será o erro. Ainda segundo o autor, modelos com valores de R^2 maior que 0,80 (80,0%) são mais confiáveis para fins preditivos. Com relação ao R^2 (adj), espera-se valores maiores, pois dessa forma o modelo consegue explicar a maior variação nas respostas. Da mesma forma, o R^2 (pred) se refere ao potencial do modelo em explicar novas observações, e por se tratar de uma equação de muitas variáveis, espera-se valores reduzidos. Na Figura 15 foi apresentado o gráfico com os pontos ótimos de dosagem e pH para a semente de Moringa.

Figura 15 - Gráfico contendo os pontos ótimos da semente de Moringa. Fonte: De autoria própria.



Na Figura 15, observa-se ainda o ponto ótimo (destacado em vermelho), para os parâmetros dosagem e pH. Este ponto evidencia a efetividade da solução na dosagem de 51,03/L e pH 7,88.

5 CONCLUSÃO

Este estudo buscou avaliar a utilização de dois coagulantes naturais em água de elevada turbidez, sendo eles o Tanfloc e a semente de Moringa, com o intuito de verificar a sua efetiva capacidade de redução em água com sólidos em suspensão proveniente da área com atividade minerária.

Os objetivos estabelecidos neste estudo foram alcançados, visto que se obteve os resultados positivos no que tange o melhor pH e a dosagem ótima dos coagulantes naturais avaliados nas condições estabelecidas e, os mesmos foram similares aos utilizados na literatura de referência.

Com os resultados obtidos, foi possível avaliar a eficiência da redução de turbidez em água com elevada turbidez, aproximadamente 2000 NTU. Com isso, a utilização dos coagulantes naturais, se mostraram como uma potencial alternativa aos coagulantes químicos, em sua maioria, comumente utilizados no tratamento da água.

O melhor resultado utilizando o Tanfloc como coagulante, foi em pH em caráter básico, igual a 10,85 e com a dosagem ótima de 80mg/L da solução, atingindo uma redução de turbidez próximo a 90%. Com relação a utilização da semente de Moringa, o melhor resultado foi em pH próximo a neutralidade, em 7,88, e com a dosagem ótima de aproximadamente 51,03mg/L, alcançando uma redução de turbidez próxima a 80%.

Espera-se que este estudo contribua para a maior utilização dos coagulantes biodegradáveis no tratamento da água, tanto como auxiliar ou como substituto aos coagulantes químicos, visto que os coagulantes naturais têm boa eficácia e não geram resíduos químicos que podem ser maléficos à saúde e ao meio ambiente.

Considerando-se ainda que nenhum conhecimento é finito, recomenda-se um maior aprofundamento no estudo sobre os coagulantes naturais, com o intuito de verificar novas condições ótimas de dosagens e pHs, em diferentes cenários, procurando sempre otimizar e tornar o processo de tratamento do nosso maior bem, a água, mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ABASTECIMENTO, U. D. T. N. T. D. Á. P. **A.L.S. GUSMÃO; M.G. SOARES**. Rio Grande do Sul: [s.n.], 2014.

ALMEIDA DE OLIVEIRA, A. P.; BENVINDO DA LUZ, A. **Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração**. [S.l.]: [s.n.], 2001.

ALVES, F. brasilmineral.com.br. **Brasil Mineral**, 2023. Disponível em: <<https://www.brasilmineral.com.br/noticias/producao-mineral-alcanca-r-250-bilhoes-em-2022>>. Acesso em: 04 mar. 2023.

BERGAMIN, D. P. **TRATABILIDADE DA ÁGUA DO RIO GUALAXO DO SUL EM MARIANA-MG - PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA PROJETO DE UNIDADES DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO**. Ouro Preto: [s.n.], 2017.

CETESB. <https://cetesb.sp.gov.br/agua/%c1guas-Superficiais/34-Vari%e1veis-de-Qualidade-das-%c1guas>, 2014. Acesso em: 2022.

CHENG. **Ensaio de Tratamento Físico-Químico de Água Potável por Coagulação-Floculação e Decantação**. [S.l.]: [s.n.], 2012.

CIMINELLI, V. S. T. S. M. J. G. . R. J. . P. Q. E. C. **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2016.

COMPARINI, A. **METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: UMA INTRODUÇÃO NOS SOFTWARES R E STATISTICA**. São Paulo: [s.n.].

CORR, D. J. et al. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 1007–1012, 2004.

DEGANI-VADUZ. <https://www.deganivaduz.com.br/aplicacao-e-importancia-do-jar-test>. **Degani-Vaduz**, 2022. Acesso em: 17 Setembro 2022.

DI BERNARDO, L. Tratamento de água para abastecimento por filtração direta, Rio de Janeiro, 2003.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, v. 1, 2005.

DI BERNARDO, L.; S., P. L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. São Carlos: LDiBe, v. 2, 2008.

E. S. PATERNIANI, J.; C. MONTAVANI, M.; R. SANT'ANNA, M. Uso de semente de Moringa oleifera para tratamento de águas superficiais, Campinas, 2009. 765 - 771.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. [S.I.]: CGEE, 2002.

FREITAS, S. P. D. **O IMPACTO DO USO E CONSUMO DE ÁGUA NA MINERAÇÃO SOBRE O BLOCO DE ENERGIA ASSEGURADA EM EMPREENDIMENTOS HIDROGERADORES: ESTUDO DE CASO DA PCH BICAS**. UFMG. Belo Horizonte. 2012.

GUSMÃO, A. L. S.; SOARES, M. G. **Uso de taninos no tratamento de água para abastecimento**. Rio Grande do Sul: [s.n.], 2014.

KONRADT-MORAES, L. C. **Estudo dos processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para obtenção de água potável**. Maringá: [s.n.], 2009.

LANA, Z. M. D. O. A atividade mineradora em Minas gerais e em Ouro Preto: Impactos socioambientais e intervenção para a sustentabilidade. **Sociedade e Território**, Natal, v. 27, p. 45 - 59, Julho/Dezembro 2015.

LANDIM DE CARVALHO, P. S. et al. Minério de Ferro. **BNDES - Biblioteca digital**, p. 197 - 234, 2021.

MARIN-MORALES, M. A. et al. Importância da água para a vida e garantida de manutenção da sua qualidade, Rio Claro-SP.

MARTINS, H. C. **Estudo sobre os processos de coagulação, floculação e decantação em efluentes oriundos de usina canavieira**. UTFP: [s.n.], 2014.

MEDEIROS, C. O. D. F. **Análise de etapa de sedimentação para o tratamento água de processo de indústria beneficiadora de arroz**. Pelotas: [s.n.], 2013.

MENDONÇA, F. C. P. Influência da mineração na geoquímica das águas superficiais e dos sedimentos no alto curso do ribeirão mata porcos do Quadrilátero ferrífero - Minas Gerais, Ouro preto, 2012.

MORAES, L. C. K. **Estudo dos processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para a obtenção de água potável.** Universidade Estadual de Maringá. Maringá, p. 223. 2009.

MUNIZ, G. L. **Otimização do tratamento de efluente lácteo sintético com uso de coagulantes alternativos.** Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2018.

NDABIGENGESERE, A.; S., N. K.; TALBOT. **Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera.** 2. ed. [S.I.]: Water Research, v. 29, 1995. 703 - 710 p.

NÓBREGA SILVEIRA, T. et al. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COAGULANTES INORGÂNICOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA SUBDIMENSIONADAS. **CONAPESC.**

OLMEZ, T. The optimization of Cr (VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology. Journal of Hazardous Materials, v. 162, n. 2-3, p. 1371-1378, 2009.

REIS, A. C. D. A. **Tratamento de Água:** Gradiente de velocidade na coagulação - floculação. Uberaba: [s.n.], 2017.

RIPLEY, E. A. R. R. E.; CROWDER, A. A. 1. E. E. O. M. D. B. S.

RITCHER, C. **Água:** Métodos e tecnologias de tratamento. São Paulo: [s.n.], 2009.

SANTOS, R. O.; RABELO, T. S.; SCRHANK, S. G. **Uso de sementes de Moringa oleífera para o tratamento de efluentes têxteis.** Belo Horizonte: [s.n.]. 2007.

SEABRA CACHEIRA, C. et al. **Processo de COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.** Porto: [s.n.], 2012.

SILVA FRANCO, C. et al. Coagulação com semente de Moringa oleifera preparada por diferentes métodos em águas com turbidez de 20 a 100 UNT, Lavras, jul/agosto 2017. 781-788.

SILVEIRA, M. K. D. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O USO DO COAGULANTE EXTRAÍDO DAS SEMENTES DE MORINGA OLEIFERA E OS COAGULANTES QUÍMICOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA.** UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA. Palhoça. 2021.

SILVEIRA, T. N. et al. Performance de coagulantes orgânicos e inorgânicos por meio de diagrama de coagulação em águas naturais. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 7, n. 1, 2019.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. C. **Quimiometria II:** Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. 2. ed. [S.l.]: Química Nova, v. 29, 2006.

TORRES, A. M. A. E. A. Utilização do coagulante orgânico natural Tanfloc SG como alternativa ao uso de sulfato de alumínio no tratamento da água. **Jornada Acadêmica integrada**, Santa Maria, 2010.

YUKIO KAMIWADA, W.; VEGA ANDRADE, P.; GONÇALVES DOS REIS, A. Emprego do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação, São José dos Campos, 20 Maio 2019. 667-676.

MATERIAL SUPLEMENTAR

1 – Análises realizadas para definição da dosagem e pH ótimos do Tanfloc.

Dosagem (mg/L)	Turbidez inicial	Turbidez Final	pH inicial	pH final	% Redução
10,00	2030	1650	7,34	7,18	18,72%
10,00	1850	1740	7,55	7,20	5,95%
20,00	2080	1850	8,06	7,71	11,06%
20,00	1930	1740	8,06	7,43	9,84%
30,00	1940	1930	8,05	7,48	0,52%
30,00	2130	1880	8,04	7,40	11,74%
40,00	2110	1980	7,50	6,74	6,16%
40,00	2170	1890	7,73	6,74	12,90%
50,00	1960	1970	7,82	6,78	-0,51%
50,00	1990	2150	7,83	6,83	-8,04%
60,00	1960	2170	7,61	6,77	-10,71%
60,00	1980	1890	7,62	6,64	4,55%
10,00	2150	48,1	10,04	8,78	97,76%
10,00	2120	36,3	10,09	9,18	98,29%
15,00	2050	53,1	10,04	7,73	97,41%
15,00	1920	46,6	10,06	8,28	97,57%
20,00	2580	45,1	10,21	7,95	98,25%
20,00	2600	46,1	10,15	8,02	98,23%
30,00	2130	1120	10,12	8,83	47,42%
30,00	2040	995	10,10	8,27	51,23%
20,00	2500	1700	8,98	7,43	32,00%

20,00	2400	1970	9,09	7,52	17,92%
20,00	2090	727	11,01	10,42	65,22%
20,00	1930	1330	11,00	10,49	31,09%
10,00	2030	1650	7,34	7,18	18,72%

2 – Análises realizadas para definição da dosagem e pH ótimos da semente de Moringa.

Dosagem (mg/L)	Turbidez inicial	Turbidez Final	pH inicial	pH final	% Redução
10,00	2490	977	7,26	7,41	60,76%
10,00	2460	912	7,45	7,49	62,93%
20,00	1910	533	7,49	7,46	72,09%
20,00	1880	742	7,50	7,34	60,53%
30,00	1890	644	7,35	7,35	65,93%
30,00	1840	744	7,35	7,32	59,57%
50,00	2190	1550	7,39	7,39	29,22%
50,00	2210	1460	7,34	7,38	33,94%
60,00	2330	1420	7,41	7,42	39,06%
60,00	2320	1420	7,40	7,28	38,79%
10,00	2460	1210	10,20	9,93	50,81%
10,00	2530	1100	10,08	9,76	56,52%