

ANA CAROLINA CHAVES DOURADO

**USO DE COAGULANTES VERDES EXTRAÍDOS EM SOLUÇÃO SALINA NO
TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DO CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Alisson Carraro Borges
Coorientadores: André Pereira Rosa
Lyda Patrícia Sabogal-Paz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D739u
2022
Dourado, Ana Carolina Chaves, 1992-
 Uso de coagulantes verdes extraídos em solução salina no
tratamento da água residuária do processamento do café / Ana
Carolina Chaves Dourado. – Viçosa, MG, 2022.
 1 dissertação eletrônica (71 f.).

Orientador: Alisson Carraro Borges.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.293>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico. 2.
Moringa oleifera. 3. *Hylocereus polyrhizus*. 4. Cloreto de cálcio .
I. Borges, Alisson Carraro, 1977-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 628.35

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva xx

ANA CAROLINA CHAVES DOURADO

**USO DE COAGULANTES VERDES EXTRAÍDOS EM SOLUÇÃO SALINA NO
TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DO CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2022.

Assentimento:



Ana Carolina Chaves Dourado
Autora



Alison Carraro Borges
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela proteção, luz, bênçãos, por me conduzir e fortalecer em todas as situações difíceis desta caminhada. A Nossa Senhora pela intercessão e cuidados concedidos em todos os momentos. A São Judas Tadeu e Santa Rita de Cássia, por toda graça recebida.

Agradeço aos meus pais, Sebastião e Selme, por todas as orações, amor, apoio, incentivo, cuidado, por estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

À minha querida amiga de infância Bazinha, pela grande amizade ao longo destes anos, por toda ajuda, carinho, apoio e por sempre ser muito prestativa e atenciosa comigo.

Ao meu orientador, Alisson, pela orientação, atenção, confiança e por todo auxílio e conhecimento compartilhado durante a realização deste trabalho.

Ao Eder, que esteve ao meu lado, sempre prestativo, disponível e paciente para ajudar, aconselhar e apoiar. À Simone, por toda ajuda, suporte, gentileza e carinho. À Maria, por toda gentileza e ajuda. Aos colegas do Laboratório da Qualidade Ambiental (LQA), por todos os momentos compartilhados.

À amiga Lari Nathi, pela amizade, conversas e risadas.

À EMBRAPA, pelo Projeto Café (Chamada 20/2018) e à Capes pelo suporte financeiro.

À Fazenda Colibri e Jatobá, por ter cedido a água residuária do processamento do café, utilizada no experimento.

Por fim, agradeço a todos que me ajudaram nesta etapa tão desafiadora na minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

DOURADO, Ana Carolina Chaves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Uso de coagulantes verdes extraídos em solução salina no tratamento da água residuária do processamento do café.** Orientador: Alisson Carraro Borges
Coorientadores: André Pereira Rosa e Lyda Patrícia Sabogal-Paz.

O processamento do café por via úmida produz grandes quantidades de efluente líquido, conhecido como água residuária do processamento do café (ARC). A ARC é considerada poluente, visto que possui pH reduzido, elevadas concentrações de matéria orgânica, sais e nutrientes. Dessa maneira, devido à estas características, é fundamental tratar este efluente antes de descartá-lo no ambiente. Uma opção viável, mas pouco utilizada é a coagulação-floculação seguida pela flotação por ar dissolvido (C/FAD). A coagulação-floculação é um método simples, eficaz e de baixo custo operacional. Já a flotação por ar dissolvido pode permitir obter-se a mesma remoção de poluentes da sedimentação, em um menor intervalo de tempo. Convencionalmente utilizam-se sais metálicos na coagulação-floculação, porém, tais produtos podem ser prejudiciais ao ambiente e à saúde humana. Assim, uma possível opção a ser estudada é a substituição dos sais metálicos por coagulantes naturais, como as sementes de *Moringa oleifera* e o cladódio da *Hylocereus polyrhizus* (pitaya vermelha). Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar C/FAD utilizando-se sementes de *Moringa oleifera* e cladódio da *Hylocereus polyrhizus* em solução salina de cloreto de cálcio no tratamento da ARC, otimizando-se as doses destes coagulantes e do sal, por meio do delineamento do composto central rotacional (DCCR). Como resultados, observou-se que com o uso da *Moringa oleifera*, 71,8% dos compostos UV₂₅₄ foram removidos e que com o uso do cladódio da *H. polyrhizus*, mais de 50,0% da turbidez foi removida. Considerando-se as várias variáveis estudadas como fatores de resposta, os valores ótimos para dose e salinidade com o uso da moringa se situam entre de 0,0 a 1,2gL⁻¹ e 5,0 a 8,0% respectivamente. Já para o uso da pitaya, os valores ótimos de dose e salinidade se situam entre 1,1 a 5,0gL⁻¹ e 4,5 a 7,0%, respectivamente. Constata-se que dissolver coagulantes naturais em solução salina é alternativa interessante no tratamento da ARC, uma vez que possibilita remoção dos contaminantes com eficiência satisfatória. O sal foi utilizado para potencializar a

coagulação, dispensando o uso de coagulantes metálicos e de alcalinizantes na correção do pH, visto que neste trabalho o pH do meio não foi alterado.

Palavras-chave: *Moringa oleifera*. *Hylocereus polyrhizus*. cloreto de cálcio. DCCR.

ABSTRACT

DOURADO, Ana Carolina Chaves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Use of green coagulants extracted in saline solution in the treatment of coffee processing wastewater.** Adviser: Alisson Carraro Borges Co-advisers: André Pereira Rosa and Lyda Patrícia Sabogal-Paz.

Wet coffee processing produces large amounts of liquid effluent, known as coffee processing wastewater (CPW). CPW is considered a pollutant, since it has a low pH, high concentrations of organic matter, salts and nutrients. Thus, due to these characteristics, it is essential to treat this effluent before discharging it into the environment. A viable but little used option is coagulation-flocculation followed by dissolved air flotation (C/DAF). Coagulation-flocculation is a simple, effective and low operating cost method. On the other hand, dissolved air flotation can allow the same removal of pollutants from the sedimentation to be obtained in a shorter period of time. Conventionally, metallic salts are used in coagulation-flocculation, however, such products can be harmful to the environment and human health. Thus, a possible option to be studied is the replacement of metallic salts by natural coagulants, such as the seeds of *Moringa oleifera* and the cladode of *Hylocereus polyrhizus* (red pitaya). Thus, the objective of this research was to evaluate C/DAF using seeds of *Moringa oleifera* and cladode of *Hylocereus polyrhizus* in saline solution of calcium chloride in the treatment of CPW, optimizing the doses of these coagulants and salt, through the central composite rotatable design (CCRD). As a result, it was observed that with the use of *Moringa oleifera*, 71,8% of the UV₂₅₄ compounds were removed and that with the use of the cladode from *H. polyrhizus*, more than 50,0% of the turbidity was removed. Considering the variables studied as response factors, the optimal values for dosage and salinity with the use of moringa range from 0.0 to 1.2 g L⁻¹ and 5.0 to 8.0%, respectively. As for the use of pitaya, the optimal dose and salinity values are between 1.1 to 5.0 g L⁻¹ and 4.5 to 5.0%, respectively. It appears that dissolving natural coagulants in saline solution is an interesting alternative in the treatment of CPW, since it allows removal of contaminants with satisfactory efficiency. Salt was used to potentialize coagulation, eliminating the use of metallic coagulants and of alkalizing agents in the pH adjustment, since in this work the pH of the medium was not altered.

Keywords: *Moringa oleifera*. *Hylocereus polyrhizus*. calcium chloride. CCRD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 3.1- Gráfico de contorno mostrando o efeitos da sementes de *Moringa oleifera* na remoção da turbidez (a) e dos compostos UV₂₅₄ (b)52
- Figura 3.2- Gráfico de contorno mostrando o efeitos do cladódio da *Hylocereus polyrhizus* na remoção da turbidez (a) e dos compostos UV₂₅₄ (b)63

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1- Processos relacionados ao tratamento da ARC..... | 17 |
| Tabela 2.2- Trabalhos relacionados ao uso de coagulantes naturais no tratamento da ARC..... | 23 |
| Tabela 3.1- Características da água residuária do processamento do café | 35 |
| Tabela 3.2- Níveis codificados e reais das variáveis independentes do DCCR para <i>Moringa oleifera</i> | 36 |
| Tabela 3.3- Níveis codificados e reais das variáveis independentes do DCCR para <i>Hylocereus polyrhizus</i> | 37 |
| Tabela 3.4- Níveis reais dos fatores estudados para a <i>Moringa oleifera</i> | 38 |
| Tabela 3.5- Níveis reais dos fatores estudados para a <i>Hylocereus polyrhizus</i> | 39 |
| Tabela 3.6- Condições operacionais na etapa de flotação por ar dissolvido..... | 41 |
| Tabela 3.7- Valores da eficiência de remoção utilizando as sementes de <i>Moringa Oleifera</i> | 44 |
| Tabela 3.8- ANOVA do modelo de regressão referente a remoção da turbidez usando <i>Moringa oleifera</i> | 46 |
| Tabela 3.9- Dados dos modelos ajustados para <i>Moringa oleifera</i> | 47 |
| Tabela 3.10- Resultado de validação para turbidez removida usando <i>Moringa Oleifera</i> | 48 |
| Tabela 3.11- Análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão referente à remoção dos compostos UV ₂₅₄ por <i>Moringa oleifera</i> | 49 |
| Tabela 3.12- Dados dos modelos ajustados para <i>Moringa oleifera</i> | 50 |
| Tabela 3.13 - Resultados dos ensaios de validação para remoção dos compostos UV ₂₅₄ usando <i>Moringa oleifera</i> | 51 |
| Tabela 3.14- Valores da eficiência de remoção utilizando do cladódio de <i>Hylocereus polyrhizus</i> | 56 |
| Tabela 3.15- Dados do modelo ajustado referente a remoção da turbidez utilizando <i>Hylocereus polyrhizus</i> | 58 |
| Tabela 3.16 - Dados dos modelos ajustados para <i>Hylocereus polyrhizus</i> | 59 |
| Tabela 3.17 - Resultados validação usando <i>Hylocereus polyrhizus</i> na remoção da turbidez | 60 |

Tabela 3.18 - ANOVA do modelo ajustado referente a remoção dos compostos UV₂₅₄ por *Hylocereus polyrhizus*.....61

Tabela 3.19 - Dados dos modelos ajustados para *Hylocereus polyrhizus*.....62

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL..... | 11 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 2.1 | Introdução..... | 14 |
| 2.2 | Água residuária do processamento do café..... | 15 |
| 2.3 | Coagulação-floculação..... | 18 |
| 2.4 | Coagulantes..... | 20 |
| 2.5 | Experiências de tratamento de arc com coagulantes orgânicos..... | 23 |
| 2.6 | Referências..... | 25 |
| 3 | ARTIGO TÉCNICO-CIENTÍFICO..... | 32 |
| 3.1 | Introdução..... | 32 |
| 3.2 | Material e métodos..... | 34 |
| 3.2.1 | Água residuária..... | 34 |
| 3.2.2 | Obtenção e preparo dos coagulantes..... | 35 |
| 3.2.3 | Planejamento experimental..... | 36 |
| 3.2.4 | Ensaio de coagulação, floculação e flotação..... | 40 |
| 3.2.5 | Determinações analíticas..... | 41 |
| 3.2.6 | Análise estatística..... | 42 |
| 3.3 | Resultados e discussão..... | 43 |
| 3.3.1 | <i>Moringa oleifera</i> | 43 |
| 3.3.2 | <i>Hylocereus polyrhizus</i> | 55 |
| 3.4 | Conclusões..... | 65 |
| 3.5 | Referências..... | 67 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

Dentre os setores econômicos brasileiros, a agricultura apresenta-se como um dos mais pujantes e lucrativos. O Brasil possui clima apropriado, disponibilidade de água e uma extensa área territorial, o que pode explicar parte do sucesso da agricultura nacional. O café é considerado um dos principais produtos agrícolas produzidos no país. Consta-se que o processamento úmido pós-colheita é o método atrativo pelos produtores para produção dos grãos, visto que este processo permite obter uma bebida de melhor qualidade, bons preços de mercado, além de permitir uma redução da área e do tempo de secagem dos grãos. Porém, durante este processamento pode haver geração de grandes quantidades de efluente, denominado de água residuária do processamento do café (ARC).

A ARC produzida durante o processamento úmido é considerada altamente poluente, uma vez que apresenta pH reduzido, elevadas concentrações de nutrientes, sais e matéria orgânica. Portanto, devido ao elevado volume de ARC produzida e também devido à sua composição físico-química, é fundamental tratar este efluente com intuito de remover as cargas poluentes antes de serem descartadas no ambiente para evitar a contaminação do corpo receptor, seja o solo ou a água. Sendo assim, uma opção viável, mas ainda pouco explorada, é o uso do processo de coagulação-floculação seguido pela flotação por ar dissolvido (C/FAD).

O processo de coagulação-floculação é conhecido como uma técnica eficaz para o tratamento de águas residuárias. A coagulação consiste em um processo de instabilidade das pequenas partículas, sendo que estas serão repelidas, por apresentarem cargas semelhantes. Na etapa seguinte (floculação) ocorre a indução a formação de pequenas partículas, que se aglomeram, formando flocos. Os flocos produzidos podem ser separados fisicamente, por sedimentação ou por flotação.

O processo de flotação consiste em um método prático, eficiente e confiável para a remoção de sólidos finamente dissolvidos e sólidos suspensos. A flotação por ar dissolvido (FAD) pode ser usada no tratamento de águas residuárias e representa um método eficaz para separar os sólidos de baixa densidade da massa líquida. Este método permite a mesma eficiência de remoção dos poluentes, ao ser comparado com a sedimentação, porém em um menor tempo. Durante o processo, é necessário introduzir água saturada com ar no tratamento, com intuito de suspender as partículas

que foram floculadas. As bolhas irão unir-se aos flocos, formando o material “flotado” que será conduzido para a superfície do flotor para ser removido.

É fundamental escolher o coagulante correto no processo de coagulação-floculação para que ocorra com eficiência a remoção dos poluentes no tratamento. Convencionalmente, são utilizados os sais metálicos (sais de alumínio ou de ferro) como coagulantes inorgânicos. Porém, tais sais são dispendiosos e ao serem utilizados no tratamento de água e efluentes contribuem para formação de um grande volume de lodo que apresenta elevadas concentrações de metais que ao serem aplicados no solo, poderão ocasionar uma possível toxidez.

Mediante aos impactos negativos ocasionados pelos coagulantes metálicos, torna-se interessante o estudo de sua substituição por coagulantes verdes ou naturais no processo de coagulação-floculação. Os coagulantes naturais são biodegradáveis, não alteram o pH da água e produzem uma menor quantidade de lodo que pode ser utilizado na agricultura. Além de serem obtidos com facilidade, podem apresentar preços bastante acessíveis.

Vários produtos de origem animal e vegetal são utilizados como coagulantes naturais, uma vez que alguns são utilizados a nível mundial no tratamento de água, como as sementes de moringa (*Moringa oleifera*). As sementes desta planta possuem características coagulantes, devido às proteínas catiônicas solúveis, que são responsáveis por desestabilizar as partículas que estão nas águas residuárias, bem como são capazes de flocular os colóides. Outras espécies vegetais não são muito relatadas na literatura, porém apresentam resultados bastantes promissores, como a *Hylocereus polyrhizus*, conhecida como pitaya ou fruta do dragão. Esta planta pertence à família *Cactaceae* e seu caule é conhecido morfológicamente como cladódio.

Com intuito de melhorar o processo de coagulação-floculação, uma alternativa interessante é dissolver os coagulantes naturais em soluções salinas. A presença dos íons desta solução permite aumentar a mobilidade dos compostos ativos, devido ao aumento da força iônica provocada pelo sal. Estes sais também possibilitam diminuir a camada difusa, uma vez que o aumento dos íons possibilitam aumentar a força iônica do meio e conseqüentemente a camada difusa vai reduzir. Ressalta-se que cátions bivalentes, como cálcio, podem ser favoráveis, pois os mesmos podem juntar com cada molécula formada no processo de coagulação, formando uma estrutura parecida a uma rede.

Sendo a dosagem de coagulantes e do sal variáveis importantes, registra-se que uma metodologia simples e eficiente para otimizar o processo é o delineamento composto central rotacional (DCCR), que permite se encontrar em pouco tempo a dosagem ideal das variáveis com um menor número de ensaios possíveis.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a coagulação-floculação seguida por flotação por ar dissolvido (C/FAD) utilizando-se os coagulantes sementes de *Moringa oleifera* e cladódio da *Hylocereus polyrhizus* em solução salina de cloreto de cálcio no tratamento da água residuária do processamento do café. Foram avaliados os níveis ótimos das doses destes coagulantes e do sal, sem alterar o pH do meio, tendo-se como variáveis-resposta as remoções de turbidez e compostos UV₂₅₄.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

As atividades cotidianas dos seres humanos nas cidades, nas indústrias e na agricultura são responsáveis por produzirem uma elevada quantidade de resíduos que ao serem descartados ocasionam em danos ao ambiente. Ressalta-se que as águas residuárias geradas na agricultura intensiva contribuem para poluição de cargas orgânicas e compostos tóxicos nos corpos hídricos receptores (WEN; SCHOUPS; VAN DE GIESEN, 2017). Dentre estas atividades, pode-se destacar o processamento úmido na produção de grãos do café (SHANMUGAM; RATHINAVELU; GUMMADI, 2021).

O processamento úmido dos grãos de café, é responsável por gerar um grande volume da chamada água residuária do processamento do café (ARC). A ARC apresenta pH reduzido e possui uma elevada quantidade de matéria orgânica, podendo causar a decomposição do nível de oxigênio nos corpos hídricos, bem como toxidez ao ambiente, quando são descartadas incorretamente. (CAMPOS et al., 2021). Dessa maneira, é fundamental reduzir os poluentes deste resíduo antes de descartá-lo. Dentre as técnicas de tratamento físico-químico, o processo de coagulação-floculação seguido por flotação de ar dissolvido é uma alternativa ainda pouco explorada, mas que pode ser viável no tratamento das águas residuárias do processamento do café.

O método conjunto de coagulação-floculação é considerado uma técnica convencional para o tratamento físico-químico de águas para abastecimento, bem como de águas residuárias (FARD et al., 2020). Este processo é empregado com intuito de remover as partículas coloidais que estão presentes nas águas residuárias. Por meio desta técnica é possível desestabilizar as substâncias coloidais para facilitar a aglomeração das mesmas (MORTADI et al., 2020).

A flotação por ar dissolvido (FAD) é usada no tratamento de águas residuárias industriais e municipais, e consiste em um processo eficaz para separar sólidos de reduzida densidade que não foram separados (LIU et al., 2010; LOPES et al., 2020; YU et al., 2020). Este processo pode acontecer após a coagulação-floculação em um sistema de injeção de ar no tratamento. A FAD é considerada uma tecnologia que

apresenta uma elevada eficiência na separação de partículas (ORTIZ-OLIVEROS; FLORES-ESPINOSA, 2020).

No processo de coagulação-floculação são adicionados coagulantes para desestabilizar as impurezas existentes. Os coagulantes mais usados são os sais metálicos, como sulfato de alumínio ou policloreto alumínio e cloreto férrico (FRANTZ et al., 2020). Estes coagulantes podem apresentar elevados custos operacionais, produzindo grandes quantidades de lodo que necessitam de um pós tratamento por apresentarem elevada toxidez. Além de serem considerados prejudiciais ao ambiente, a presença destes sais também são nocivos à saúde humana (CAN; GENGEK; KOBYA et al., 2019).

Com intuito de promover uma tecnologia ecologicamente correta, os coagulantes naturais, também conhecidos como coagulantes verdes, são considerados uma alternativa na substituição dos coagulantes químicos. Tais coagulantes são derivados de plantas, sementes, crustáceos, com atenção especial às partes não comerciais destes. Os coagulantes verdes são biodegradáveis, produzem baixa quantidade de lodo, não são tóxicos, além de não prejudicar o meio ambiente e à saúde humana (FARD et al., 2021; OKOLO et al., 2021).

Para melhor contextualização da pesquisa realizada, nos próximos itens da revisão bibliográfica serão abordados aspectos relativos à água residuária produzida no processamento úmido do café, ao processo de coagulação-floculação, ao método flotação por ar dissolvido e por fim, aos coagulantes verdes, especificamente a *Moringa oleífera* e a *Hylocereus polyrhizus*.

2.2 Água residuária do processamento do café

O Brasil é considerado o maior produtor mundial de café, e ao longo dos anos, o cultivo, a industrialização e a comercialização da produção cafeeira foi se destacando no país. A agroindústria cafeeira gera uma grande quantidade de empregos, bem como um amplo comércio exterior para o país. A produção de café no Brasil acontece em quinze estados, sendo que Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo são os principais produtores. (GOMES et al., 2020; PIN et al., 2020).

Durante a época da colheita, os grãos de café são separados e processados por um processo seco ou úmido. O seco caracteriza-se por ser uma técnica simples de secagem dos grãos, em que os grãos de café são secos em um terreno extenso,

sob a luz solar direta, em seguida ocorre a remoção manual da parte externa dos grãos e a limpeza dos mesmos. Este processo produz produtos de menor qualidade, porém geram uma pequena quantidade de água residuária (SAID et al., 2021).

O processo úmido inicia-se pela triagem, na qual os grãos de café são introduzidos na água. Nesta etapa os grãos que não apresentam um bom desenvolvimento flutuam para ser removidos, juntamente com folhas, galhos que foram coletados com os frutos. Em seguida ocorre a despolpação, etapa na qual a camada externa da semente do café é removida, permanecendo apenas uma camada viscosa de mucilagem ao redor do grão. Nesta etapa gera-se uma elevada quantidade de matéria orgânica, dificultando-se a degradação da mucilagem dos grãos. Posteriormente, ocorre a fermentação da mucilagem, decompondo a camada, para que então o grão de café seja lavado novamente. Logo após, acontece uma nova lavagem, utilizando-se água limpa até a remoção completa da mucilagem. Por fim, o grão é submetido à secagem (IJANU; KAMARUDDIN; NORASHIDDIN, 2020).

O processamento úmido produz uma elevada quantidade de efluente, denominado de água residuárias do processamento do café (ARC). A ARC pode apresentar uma alta toxicidade, uma vez que possui pH reduzido e grande quantidade de poluentes. Se for descartada sem um tratamento prévio nos corpos hídricos receptores, a ARC irá ocasionar problemas, como a depleção do nível de oxigênio da água, que este fato pode provocar a morte dos organismos aquáticos, bem como ocasionar condições anaeróbias nos cursos hídricos (IJANU; KAMARUDDIN; NORASHIDDIN, 2020; CAMPOS et al., 2021).

Portanto, devido à composição físico-química da água residuária do processamento do café e ao grande volume produzido, é fundamental tratar este resíduo antes de ser descartado no ambiente (PIRES et al., 2017).

Campos et al. (2021) relatam que existem técnicas para o tratamento da ARC, como fertirrigação, digestão anaeróbia, eletrocoagulação e processos de coagulação-floculação. Ijanu, Kamaruddin e Norashiddin (2020) afirmam que a troca iônica é um método eficaz no tratamento da ARC, uma vez que a mesma pode ser considerada a melhor possibilidade na gestão da água residuária do café, pois este método é ecológico e eficaz, além de atuar como trocador e absorvedor de íons.

Segundo Novita et al. (2019) o processo de coagulação-floculação é um método eficaz no tratamento da ARC. Os autores utilizaram o coagulante natural *Moringa oleífera* no processo de coagulação-floculação e obtiveram bons resultados

na remoção dos sólidos suspensos totais, turbidez e demanda química de oxigênio. Apesar do relato anterior, ressalta-se que não há estudos na literatura abordando o processo de coagulação-floculação seguido pela flotação por ar dissolvido no tratamento da ARC, sendo a possibilidade interessante, pois a massa específica dos grãos do café oscila entre 0,99 a 1,23 g cm³ (BUIRAGO-OSORIO et al., 2022). Portanto esse valor pode ser favorável para o processo de flotação por ar dissolvido.

Ressalta-se que na literatura não foram encontrados estudos relacionados à salinidade e a flotação por ar dissolvido abordando a ARC. Entretanto, existem trabalhos que usam a coagulação e a eletrocoagulação no tratamento desta água residuária, como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Processos relacionados ao tratamento da ARC

| Processo | Coagulante | Objetivo | Referências |
|--|----------------------------------|---|---|
| Oxidação Fenton; Coagulação- floculação | Cloreto de ferro | Comparar a eficiência dos processos | (GOMES DE BARROS et al.,2020) |
| Coagulação química | Sulfato de ferro, alumínio e cal | Avaliar o potencial do processo na remoção da cor do efluente | (PANCHANGAM;JAN AKIRAMAN, 2015) |
| Coagulação-floculação | <i>Moringa oleifera</i> | Remover as impurezas do efluente | (PADMAPRIYA; THARIAN; THIRUNALASUNDARI, 2015) |
| Coagulação-floculação | <i>Moringa oleifera</i> | Otimizar o processo | (NOVITA et al., 2019). |
| Coagulação-floculação | <i>Moringa oleifera</i> | Redução de nitrato, nitrito, SST | (GARDE et al., 2017) |
| Coagulação-floculação | <i>Ricinus communis</i> | Remover cor, SDT, DQO | (A et al., 2021) |

Fonte: Própria autora.

2.3 Coagulação-floculação

O processo de coagulação–floculação é utilizado no tratamento de águas devido à sua eficiência satisfatória. A coagulação consiste na adição de coagulantes que provocam alteração do estado físico dos sólidos suspensos e dissolvidos para serem removidos (DOTTO et al., 2019; HUANG et al., 2014). A etapa de floculação corresponde a indução de pequenas partículas que vão se aglomerar, formando flocos que podem ser separados por processos físicos, como a flotação por ar dissolvido (ARUMUGAM et al., 2020).

O processo de coagulação-floculação consiste portanto na adição de coagulantes que funcionam como desestabilizadores para as partículas coloidais e suspensas que estão presentes água residuária (ABU-DALO et al., 2022). Esta técnica fundamenta-se em duas etapas, a primeira consiste na mistura rápida de coagulantes em que a água residuária será misturada sob forte agitação. Em seguida ocorre a floculação, nesta a agitação é lenta para promover o acúmulo de pequenas partículas em flocos (MOHAMAD NOOR et al., 2022).

Dentre as vantagens da coagulação-floculação citam-se a facilidade de operação e eficiência na remoção de poluentes (CAMPOS et al., 2021; IJANU; KAMARUDDIN; NORASHIDDIN, 2020). Portanto, devido à estes benefícios esta técnica pode ser viável na remoção dos compostos coloidais da água residuária do processamento do café.

Ressalta-se que a eficiência da técnica de coagulação-floculação e o mecanismo que será dominante no processo, estão relacionados à fatores como pH inicial da água residuária, temperatura da mesma, tipo de coagulante usado, dosagem do coagulante, o tempo de mistura rápida na coagulação, bem como o tempo de estabilização na floculação. Constata-se que a otimização destas variáveis pode aumentar a eficiência do processo (DAUD; SHEIK ABDULLAH; ABU HASAN, 2018; KIM, 2016).

O método de coagulação-floculação possui elevada aplicabilidade e eficiência na remoção dos poluentes. A ARC apresenta vários poluentes coloidais aquosos. Estes são partículas estáveis devido às cargas eletrostáticas superficiais. Constata-se que a maioria dos coloides possuem cargas negativas, que serão repelidas, diminuindo a tendência de aglomeração e assentamento destas partículas. Estes coloides podem ser neutralizados por espécies catiônicas, conhecidos coagulantes,

que são responsáveis em neutralizar a carga entre as partículas suspensas. O coagulante é essencial no processo de coagulação-floculação, uma vez que tais produtos são adicionados às águas residuárias com intuito de desestruturar o material coloidal, conseqüentemente provocar a junção das partículas pequenas, transformando-as em flocos maiores para serem removidos (FREITAS et al., 2015; HUZIR et al., 2019; MERAZ et al., 2016).

Os principais mecanismos de coagulação por meio de coagulantes verdes que apresentam compostos ativos são: (i) adsorção, na qual polímeros naturais oferecem uma superfície livre para adsorção de compostos coloidais e formação de partículas maiores que são capazes de assentarem-se com facilidade; (ii) neutralização de cargas, na qual particulados com íons de cargas opostas sofrem atração eletrostática; (iii) pontes, mecanismo no qual um coagulante gera uma cadeia polimérica a qual é responsável por absorver partículas. Portanto, os coagulantes verdes que possuem compostos ativos podem neutralizar cargas e/ou formar pontes entre as partículas coloidais para criar flocos que podem ser sedimentados rapidamente com intuito de serem separados (AHMAD et al., 2021; KUMAR; OTHMAN; ASHARUDDIN, 2017). A separação dos flocos formados na coagulação-floculação pode ser feita por gravidade, utilizando-se da sedimentação ou da flotação por ar dissolvido.

Embora a sedimentação seja a via mais usada para separação dos flocos formados na coagulação-floculação, a flotação por ar dissolvido (FAD) é um método muito interessante no tratamento de águas residuárias, pois nele necessita-se de uma pequena área de operação, o investimento de implementação pode ter um retorno rápido e os níveis de eficiência de remoção de poluentes podem ser satisfatórios (MUNIZ; BORGES; SILVA, 2020).

A coagulação-floculação associada à FAD é um processo rápido ao ser comparado com a sedimentação (BOGAKI et al., 2017). A FAD é representada por um sistema trifásico de separação sólido-líquido, em que as microbolhas de ar são introduzidas na água residuária com intuito de remover os flocos formados na etapa anterior (coagulação-floculação). Estas microbolhas são formadas na câmara de saturação, unidade onde o ar é dissolvido sob elevados valores de pressão (MORUZZI; REALI, 2014).

Constata-se que este método é baseado na variação da solubilidade do ar na água, conforme a pressão do sistema. Primeiramente, há a saturação do ar sob elevada pressão. Em seguida, a água saturada é inserida na coluna de flotação por

meio de válvulas do tipo agulha ou orifícios, permitindo a produção de microbolhas, reduzindo a pressão do sistema. As partículas hidrofóbicas da água residuária podem ser capturadas, por meio da colisão e fixação, pelas microbolhas e posteriormente serão conduzidas para a parte superior da coluna de flotação (SANTANA et al., 2021; SANTOS et al., 2021).

A eficiência da FAD está relacionada com a determinação do volume de microbolhas que dependem da razão de recirculação e da pressão da câmara de saturação. O tamanho das bolhas interferem no processo, pois bolhas menores possuem melhor eficiência para a separação de partículas da água residuária e a melhor separação também pode ser obtida quando as mesmas têm praticamente o mesmo tamanho. O tamanho das bolhas produzidas nos sistemas FAD é geralmente entre 10 e 500 micrômetros (FANAIE; KHIADANI; AYRES, 2019).

Embora bastante utilizado no tratamento de águas residuárias diversas, o uso desta técnica para o tratamento da água residuária do processamento do café, é uma opção ainda pouco explorada.

A eficiência do processo de coagulação-floculação contribui para melhorar a eficiência de captura de partículas de bolhas no processo de FAD. Portanto, é fundamental a escolha de um bom coagulante na etapa de coagulação-floculação, já que tais produtos podem reduzir a carga negativa nas superfícies dos poluentes, ultrapassando-se a repulsão eletrostática e, conseqüentemente, aumentando-se a adesão às bolhas (SANTANA et al., 2021; WANG et al., 2021).

2.4 Coagulantes

Os coagulantes possuem grande importância no desempenho do processo de coagulação-floculação, pois estes promovem a alteração no estado químico das águas residuárias, desestabilizando as partículas carregadas e possibilitando a aglomeração. Os coagulantes podem ser divididos em coagulantes químicos, polímeros sintéticos e coagulantes naturais. Ressalta-se que os mais utilizados são os coagulantes químicos oriundos de sais metálicos, como o sulfato de alumínio, o policloreto de alumínio, o cloreto férrico e o sulfato férrico (AHMAD et al., 2021; LI et al., 2018; ZHANG et al., 2021).

Apesar da extensa aplicação dos coagulantes químicos, estes apresentam desvantagens, uma vez que possuem elevado custo, produzem uma grande

quantidade de lodo, afetam o pH da água e produzem resíduos não biodegradáveis (A et al., 2021; OLADOJA, 2015). Ademais tais produtos afetam a saúde humana, pois podem apresentar impactos neurotóxicos e cancerígenos, bem como podem causar doenças neurodegenerativas, como Alzheimer (A et al., 2021; OLADOJA, 2015; PAL et al., 2011).

Theodoro et al. (2013) destacam que coagulantes naturais se apresentam como alternativas viáveis para substituir ou reduzir o uso de coagulantes metálicos devido ao seu baixo custo e por abundância de plantas que podem se apresentar como fonte para extração. Assim sendo, uma alternativa interessante é substituir os coagulantes químicos por coagulantes verdes no processo de coagulação-floculação. Estes coagulantes são biodegradáveis, não tóxicos, menos onerosos, produzem menos lodo e podem ser adquiridos com facilidade, já que as plantas podem ser cultivadas localmente (KUSUMA et al., 2021).

Ainda em relação aos coagulantes verdes, Choy et al. (2014) e Okolo et al. (2021) afirmam que os mesmos não consomem alcalinidade, não sendo necessário realizar ajuste de pH, contribuindo também para um processo mais econômico. Já Aziz et al. (2021) evidenciam que estes coagulantes apresentam uma elevada quantidade de cargas superficiais que contribui para aumentar a eficiência do processo de coagulação.

Segundo Ang e Mohammad (2020) os coagulantes verdes derivados de plantas apresentam os grupos funcionais hidroxila e amido, estes contribuem para a capacidade de coagulação. Tais compostos ajudam a desestabilizar os coloides e formar microflocos e macroflocos por meio da neutralização de carga e pontes entre as partículas. A neutralização de cargas corresponde à adsorção dos coagulantes com cargas nas superfícies dos compostos coloidais que apresentam cargas opostas, possibilitando a neutralização. Já nas pontes há a adsorção de segmentos dos coagulantes em superfícies coloidais adjacentes, nesta etapa o coagulante e o coloide apresentam cargas semelhantes, formando uma ponte entre as partículas poluentes. Assim, os flocos são formados, e podem ser sedimentados rapidamente para serem separados (KUMAR, OTHMAN, N; ASHARUDDIN, 2017; SALEEM; BACHIMANN, 2019).

Normalmente, as etapas de extração e a purificação dos coagulantes verdes originados de plantas são baseadas em três estágios. O primeiro está relacionado ao tratamento prévio no processamento da amostra apropriada para a segunda etapa.

Em seguida, os compostos que apresentam atividade de coagulação são extraídos por solução salina, solução aquosa ou outro solvente apropriado. No terceiro estágio acontece a purificação dos compostos que auxiliam na coagulação. Ressalta-se que os compostos que contribuem para o processo de coagulação são as proteínas ou polissacarídeos contidos no extrato. A eficiência da coagulação está relacionada com a pureza dos compostos ativos (ANG; MOHAMMAD, 2020; YIN, 2010).

Os coagulantes naturais podem ser preparados em solução salina (cloreto de cálcio, cloreto de magnésio ou cloreto de sódio). Dissolver tais coagulantes em solução salina é viável, devido ao *salting-in*, processo conhecido como efeito íon comum que permite a dissociação proteína-proteína. A adição do sal contribui para aumentar a força iônica da solução, contribuindo no aumento da solubilidade da proteína necessária no processo de coagulação (OTHMANI; RASTEIRO; KHADHRAOUI, 2020; SANTOS et al., 2012). Ahmad et al. (2021) afirmam que dentre os métodos de extração, a solução salina é mais eficaz ao ser comparado com soluções solventes e com a água, pois as soluções salinas possibilita uma melhor remoção dos compostos ativos para coagular os sólidos em suspensão no tratamento das águas residuárias.

Ressalta-se que os coagulantes podem ser adicionados diretamente na água residuária, porém, os mesmos apresentam impurezas como proteínas e carboidratos que degradam a qualidade do tratamento da água residuária, sendo assim, é interessante extraí-los em solução salina (GIDDE; BHALERÃO; MALUSARE, 2012).

Existem alguns desafios em relação ao uso de coagulantes naturais no tratamento de águas residuárias. Tais desafios estão relacionados ao *up-scale*, ou seja o aumento de escala, visando o uso de tais coagulantes em escala industrial. Este fato está associado à fatores como conscientização de mercado, restrições financeiras de pesquisa e aprovação regulatória. (CHOY et al., 2014).

Os estudos de coagulantes naturais no tratamento de água surgiram desde 1970, sendo que o Brasil é um dos países que possuem mais publicações. Um dos fatores que contribui para isto é a zona climática do país, pois a mesma contribui para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Destaca-se que várias partes das plantas podem ser usadas como coagulantes, incluindo sementes, frutos, folhas, além dos cactos e arbustos (AHMAD et al., 2021; ANG; MOHAMMAD, 2020; OLADOJA, 2015).

2.5 Experiências de tratamento de arc com coagulantes orgânicos

Na tabela 2.2 visualizam-se dados de trabalhos na literatura que usam coagulantes naturais no tratamento da ARC.

Tabela 2.2 - Trabalhos relacionados ao uso de coagulantes naturais no tratamento da ARC.

| Referência | Coagulante | Resultados |
|---------------------|-------------------------------------|--|
| A et al.(2021) | <i>Ricinus communis</i> (mamona) | Redução de 80% da cor, 75% dos SST e 80% da DQO |
| Novita et al.(2019) | <i>Moringa oleifera</i> | Redução de 60% dos SST; 69,44% da turbidez e 41,80% DQO |
| Garde et al.(2017) | <i>Moringa oleifera</i> | Redução 54% dos SST; 25% da DQO total; 26% a 100% da DQO total |
| Matos et al.(2007) | <i>Moringa oleifera</i> | Redução de 90% da turbidez |

Fonte: Própria autora.

Como pode ser observado, na maioria dos estudos, o coagulante natural utilizado no tratamento da ARC é a *Moringa oleifera*. Observa-se que não há estudos relatando o uso da *Hylocereus polyrhizus* no tratamento da ARC. A seguir, serão abordados alguns aspectos sobre a *Moringa oleifera* e a *H. polyrhizus*.

A *Moringa oleifera* é uma árvore nativa do subcontinente indiano, mas que devido ao seu cultivo contínuo, adaptou-se nas regiões tropicais e subtropicais do mundo. A planta, pertence à família *Moringaceae* é usada no processo de coagulação-floculação como coagulante natural, devido às proteínas catiônicas solúveis que suas sementes apresentam. Tais proteínas criam uma carga positiva, originando em uma atração eletrostática com as partículas que estão carregadas negativamente na água residuária (GANDIWA et al., 2020; UEDA YAMAGUCHI et al., 2021).

Evidencia-se que o composto ativo é encontrado dentro do grão da semente da *Moringa oleifera*. As sementes possuem a capacidade de reter partículas de polieletrólitos catiônicos com intuito de produzir cargas positivas que ao entrar em contato com a água residuária, ocorre uma atração eletrostática pelos compostos

coloidais que estão carregadas negativamente no resíduo. Sendo assim, o processo de mistura no processo de coagulação-floculação permite a aglomeração por meio da colisão de partículas que encontram-se neutralizadas para produzir flocos que posteriormente podem ser separados (AHAMAD et al., 2021; GANDIWA et al., 2020).

Adicionar as sementes de *Moringa oleifera* em solução salina permite o surgimento de outro componente ativo além da proteína e polissacarídeo, denominado de polieletrólito. O extrato da semente atua pela adsorção dos coloides, seguido pela neutralização de cargas do composto, possibilitando assim posterior separação dos sólidos (ANG; MOHAMMAD, 2020; JUNG et al., 2018). Segundo Behera e Balasubramanian (2019) é interessante utilizar a solução salina com *Moringa oleifera* no intuito de extrair os compostos ativos do coagulante, melhorando assim a eficiência do processo de coagulação-floculação. Kumar; Othman e Asharuddin (2017) afirmam que os cátions bivalentes, como cloreto de cálcio, aumentam o efeito deste coagulante.

Em relação à *Hylocereus polyrhizus*, estas plantas pertencem ao gênero *Hylocereus* e à família Cactaceae. A planta originou-se nas regiões tropicais da América Central e do Sul, entretanto e como possui facilidade de adaptação aos diversos solos e climas, pode ser encontrada em vários países. São conhecidas como pitayas ou frutas dragão e produzem frutos que possuem casca vermelha com brácteas verdes que estão sobrepostas, polpa vermelho-púrpura e pequenas sementes pretas (ANGONESE et al., 2021; DE ARAÚJO et al., 2021).

Dentre as características da família Cactaceae encontra-se a produção de mucilagens. Essas substâncias estão distribuídas em várias partes da planta, como cladódio, casca e polpa. A mucilagem é um polissacarídeo que dilata ao ser dissolvido em água, criando uma forma viscosa. Ressalta-se que a mucilagem foi relatada eficaz no processo de coagulação-floculação, uma vez que a mesma foi eficiente na remoção da demanda química de oxigênio, cor, turbidez de diferentes tipos de águas residuárias (IDRIS et al., 2013; MONTOYA-ARROYO et al., 2014). A mucilagem possui o ácido galacturônico, e segundo Yin (2010), o mesmo é o principal agente coagulante ativo em plantas, independente da espécie.

No caso da pitaya, o processo de coagulação-floculação pode ocorrer principalmente pela adsorção propiciado por pontes existentes entre as partículas, na qual a formação do composto partícula-polissacarídeo-partícula acontece por causa

da natureza macromolecular da mucilagem (CHOUDHARY; RAY; NEOGI, 2019; CHOY et al., 2014).

Percebe-se portanto que a *Moringa oleifera* é o coagulante natural mais usado no tratamento da ARC e que, devido às características da pitaya, esta planta também pode ter potencial para ser usada no tratamento desta água residuária.

2.6 Referências

A, A. J. et al. Treatment of coffee cherry pulping wastewater by using lectin protein isolated from *Ricinus communis* L. seed. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, n. October 2020, p. 101742, 2021.

ABU-DALO, M. et al. Coupling coagulation-flocculation to volcanic tuff-magnetite nanoparticles adsorption for olive mill wastewater treatment. **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, v. 17, n. November 2021, p. 100626, 2022.

ADJEROUD, N. et al. Improvement of electrocoagulation-electroflotation treatment of effluent by addition of *Opuntia ficus indica* pad juice. **Separation and Purification Technology**, v. 144, p. 168–176, 2015.

AHMAD, A. et al. Exploring the extraction methods for plant-based coagulants and their future approaches. **Science of the Total Environment**, n. xxxx, p. 151668, 2021.

ALVES, C.Z.; GODOY, A.R.; CORRÊA, L.S. Adequação da metodologia para o teste de germinação de sementes de pitaya-vermelha. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.5, p. 789-794, 2011

ALVES, R. C. et al. State of the art in coffee processing by-products. In: **Handbook of coffee processing by-products**. Academic Press, p. 1-26, 2017.

ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121267, 2020.

ANGONESE, M. et al. Organic dragon fruits (*Hylocereus undatus* and *Hylocereus polyrhizus*) grown at the same edaphoclimatic conditions: Comparison of phenolic and organic acids profiles and antioxidant activities. **Lwt**, v. 149, n. March, 2021.

ARUMUGAM, V. et al. Synthesizing green Chitosan-magnetic composite particles for palm oil mill effluent (POME) pre-treatment: A comprehensive review. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

AZIZ, A. et al. Green coagulant from *Dillenia indica* for removal of bis(2-ethylhexyl) phthalate and phenol, 4,4'-(1-methylethylidene)bis- from landfill leachate. **Environmental Technology and Innovation**, v. 24, p. 102061, 2021.

BEHERA, B.; BALASUBRAMANIAN, P. Natural plant extracts as an economical and ecofriendly alternative for harvesting microalgae. **Bioresource Technology**, v. 283, n. January, p. 45–52, 2019.

BOGACKI, J. P. et al. Cosmetic wastewater treatment using dissolved air flotation. **Archives of Environmental Protection**, v. 43, n. 2, p. 65–73, 2017.

BUITRAGO-OSORIO, J. et al. Physical-mechanical characterization of coffee fruits *Coffea arabica* L. var. Castillo classified by a colorimetry approach. **Materialia**, p. 101330, 2022.

CAMPOS, R. C. et al. New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. **Future Foods**, v. 4, n. April, 2021.

CAN, O. T.; GENGEÇ, E.; KOBYA, M. TOC and COD removal from instant coffee and coffee products production wastewater by chemical coagulation assisted electrooxidation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 28, n. September 2018, p. 28–35, 2019.

CHOUDHARY, M.; RAY, M. B.; NEOGI, S. Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. **Separation and Purification Technology**, v. 209, n. July 2018, p. 714–724, 2019.

CHOY, S. Y. et al. Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 26, n. 11, p. 2178–2189, 2014

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. Treatments for color removal from wastewater: State of the art. **Journal of Environmental Management**, v. 236, n. October 2018, p. 727–745, 2019.

COSTA, A. C.; RAMOS, D. J.; SILVA, F. O. R.; DUARTE, M. H. Floração e frutificação em diferentes tipos de cladódios de pitaia-vermelha em Lavras –MG. **Rev. Bras. Frutic.** 36 (1). P.279-284, 2018.

DAUD, N. M.; SHEIKH ABDULLAH, S. R.; ABU HASAN, H. Response surface methodological analysis for the optimization of acid-catalyzed transesterification biodiesel wastewater pre-treatment using coagulation–flocculation process. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 113, n. 2014, p. 184–192, 2018.

DE ARAÚJO, F. F. et al. Underutilized plants of the Cactaceae family: Nutritional aspects and technological applications. **Food Chemistry**, v. 362, n. May, 2021.

DE BARROS, V. G. et al. Treatment of biodigested coffee processing wastewater using Fenton’s oxidation and coagulation/flocculation. **Environmental Pollution**, v. 259, 2020.

DOTTO, J. et al. Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 656-665, 2019.

FANAIE, V. R.; KHIADANI, M.; AYRES, T. Effects of internal geometry on hydrodynamics of dissolved air flotation (DAF) tank: An experimental study using particle image velocimetry (PIV). **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 575, n. May, p. 382–390, 2019.

FARD, M. B. et al. Utilization of Alyssum mucilage as a natural coagulant in oily-saline wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, p. 101763, 2020.

FRANTZ, T. S. et al. Preparation of new biocoagulants by shrimp waste and its application in coagulation-flocculation processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122397, 2020.

FREITAS, T. K. F. S. et al. Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. **Industrial Crops and Products**, v. 76, p. 538–544, 2015.

GANDIWA, B. I. et al. Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (*Moringa Oleifera*-Cactus *Opuntia*-alum blend). **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. July, p. 158–164, 2020.

GARDE, W. K. et al. Application of *Moringa Oleifera* seed extract to treat coffee fermentation wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 329, p. 102–109, 2017.

GEORGE, T. T. et al. *Moringa oleifera* through the years: a bibliometric analysis of scientific research (2000-2020). **South African Journal of Botany**, v. 141, p. 12–24,

GIDDE, M. R.; BHALERAO, A. R.; MALUSARE, C. N. Comparative Study of Different Forms of *Moringa Oleifera* Extracts for Turbidity Removal. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 2, n. 1, p. 14–21, 2012.

GOMES DE BARROS, V. et al. Treatment of biodigested coffee processing wastewater using Fenton's oxidation and coagulation/flocculation. **Environmental Pollution**, v. 259, 2020.

GOMES, L. C. et al. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 294, n. January, p. 106858, 2020.

GOPALAKRISHNAN, L.; DORIYA, K.; KUMAR, D. S. *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. **Food Science and Human Wellness**, v. 5, n. 2, p. 49–56, 2016.

GUPTA, S. et al. Nutritional and medicinal applications of *Moringa oleifera* Lam.— Review of current status and future possibilities. **Journal of Herbal Medicine**, v. 11, n. July 2017, p. 1–11, 2018.

HUANG, X. et al. Effects of compound bioflocculant on coagulation performance and floc properties for dye removal. **Bioresource Technology**, v. 165, n. C, p. 116–121, 2014.

HUZIR, N. M. et al. Optimization of coagulation-flocculation process for the palm oil mill effluent treatment by using rice husk ash. **Industrial Crops and Products**, v. 139, n. May, p. 111482, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo rural: pitaia**. Disponível em: https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html?localidade=0&tema=76370. Acesso em: 28 dez 2021.

IDRIS, J. et al. Dragon fruit foliage plant-based coagulant for treatment of concentrated latex effluent: Comparison of treatment with ferric sulfate. **Journal of Chemistry**, v. 2013, p. 1- 7, 2013.

IJANU, E. M.; KAMARUDDIN, M. A.; NORASHIDDIN, F. A. Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Applied Water Science**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020.

JUNG, Y. et al. Evaluation of *Moringa oleifera* seed extract by extraction time: Effect on coagulation efficiency and extract characteristic. **Journal of Water and Health**, v. 16, n. 6, p. 904–913, 2018.

KARAGÜZEL, C. Selective separation of fine albite from feldspathic slime containing colored minerals (Fe-Min) by batch scale dissolved air flotation (DAF). **Minerals Engineering**, v. 23, n. 1, p. 17–24, 2010.

KIM, S. C. Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation-flocculation process for pre-treating paper wastewater. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 38, p. 93–102, 2016.

KUMAR, V.; OTHMAN, N.; ASHARUDDIN, S. Applications of Natural Coagulants to Treat Wastewater - A Review. **MATEC Web of Conferences**, v. 103, p. 1–9, 2017.

KUSUMA, H. S. et al. Evaluation of extract of Ipomoea batatas leaves as a green coagulant–flocculant for turbid water treatment: Parametric modelling and optimization using response surface methodology and artificial neural networks. **Environmental Technology and Innovation**, v. 24, p. 102005, 2021.

LEE, J. et al. Refractory oil wastewater treatment by dissolved air flotation, electrochemical advanced oxidation process, and magnetic biochar integrated system. **Journal of Water Process Engineering**, v. 36, n. January, p. 101358, 2020.

LI, J. et al. Effect of silicon content on preparation and coagulation performance of poly-silicic-metal coagulants derived from coal gangue for coking wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 202, n. March, p. 149–156, 2018.

LIU, S. et al. Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater. **Separation and Purification Technology**, v. 71, n. 3, p. 337-346, 2010.

LOPES, V. D. S. et al. Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 567-572, 2020.

MATOS, A. T. et al. Efeito da concentração de coagulantes e do pH da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 544–551, 2007.

MERAZ, K. A. S. et al. Eco-friendly innovation for nejayote coagulation-flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 536–542, 2016.

MOHAMED NOOR, M. H. et al. *Moringa oleifera* extract as green coagulant for POME Treatment: Preliminary studies and sludge evaluation. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1940–1947, 2020.

MONTOYA-ARROYO, A. et al. Characterization of cell wall polysaccharides of purple pitaya (*Hylocereus sp.*) pericarp. **Food Hydrocolloids**, v. 35, p. 557–564, 2014.

MORTADI, A. et al. Complex electrical conductivity as a new technique to monitor the coagulation-flocculation processes in the wastewater treatment of the textile Industry. **Water Resources and Industry**, v. 24, p. 100130, 2020.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Estudo hidrodinâmico quali-quantitativo de uma unidade de flotação por ar dissolvido (FAD): O efeito do dispositivo de coleta de água flotada. **Revista DAE**, nº194, janeiro-abril 2014.

MUELLER, B; MUELLER, C. The political economy of the Brazilian model of agricultural development: Institutions versus sectoral policy. **The quarterly review of economics and finance**, v. 62, p. 12-20, 2016.

MUNIZ, G. L.; BORGES, A. C.; SILVA, T. C. F. DA. Performance of natural coagulants obtained from agro-industrial wastes in dairy wastewater treatment using dissolved air flotation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 37, n. April, p. 101453, 2020.

NOVITA, E. et al. Moringa Seeds (*Moringa olifera L.*) Application as Natural Coagulant in Coffee Wastewater Treatment. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 347, n. 1, 2019.

OLADOJA, N. A. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. **Journal of Water Process Engineering**, v. 6, p. 174–192, 2015.

OKOLO, B. I. et al. Coagulation kinetic study and optimization using response surface methodology for effective removal of turbidity from paint wastewater using natural coagulants. **Scientific African**, v. 14, p. 00959, 2021.

ORTIZ-OLIVEROS, H. B.; FLORES-ESPINOSA, R. M. Design of a mobile dissolved air flotation system with high rate for the treatment of liquid radioactive waste. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 144, p. 23–31, 2020.

OTHMANI, B.; RASTEIRO, M. G.; KHADHRAOUI, M. Toward green technology: a review on some efficient model plant-based coagulants/flocculants for freshwater and wastewater remediation. **Clean Techn Environ Policy** v. 22, p.1025–1040, 2020.

PADMAPRIYA, R.; THARIAN, J. A.; THIRUNALASUNDARI, T. Original Research Article Treatment of coffee effluent by *Moringa oleifera* seed. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 4, n. 1, p. 288–295, 2015.

PANCHANGAM, S. C.; JANAKIRAMAN, K. Decolorization of aqueous coffee and tea infusions by chemical coagulation. **Desalination and Water Treatment**, v. 53, n. 1, p. 119–125, 2015.

PAL, S. et al. Flocculation properties of polyacrylamide grafted carboxymethyl guar gum (CMG-g-PAM) synthesised by conventional and microwave assisted method. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 3, p. 1580–1588, 2011.

PEREIRA, M. DOS S. et al. Treatment of synthetic milk industry wastewater using batch dissolved air flotation. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 729–737, 2018.

PIN, B. V. DA R. et al. Energetic use of biogas from the anaerobic digestion of coffee wastewater in southern Minas Gerais, Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2084–2094, 2020.

PIRES, J. F. et al. Diversity of microbiota found in coffee processing wastewater treatment plant. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 33, n. 12, p. 211, 2017.

PIRES, J. F. et al. Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 278, p. 111541, 2020.

SHAFAD, M. R.; AHAMAD, I. S.; IDRIS, A.; ABIDIN, Z. Z. A Preliminary Study on Dragon Fruit Foliage as Natural Coagulant for Water Treatment. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 2, 2013.

SAID, N. S. M. et al. Endurance of Phragmites karka in removing colour and suspended solids from industrial coffee processing effluents in a continuous reed bed system. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, n. November 2020, p. 101832, 2021.

SALEEM, M.; BACHMANN, R. T. A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 72, p. 281–297, 2019.

SANTANA, R. C. et al. Flotation of fine apatitic ore using microbubbles. **Separation and Purification Technology**, v. 98, p. 402–409, 2012.

SANTOS, A. F. S. et al. Coagulant properties of *Moringa oleifera* protein preparations: Application to humic acid removal. **Environmental Technology**, v. 33, n. 1, p. 69–75, 2012.

SANTOS, M. A. et al. Wastewater treatment using DAF for process water reuse in apatite flotation. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, n. May, p. 127285, 2021.

SHANMUGAM, M. K.; RATHINAVELU, S.; GUMMADI, S. N. Self-directing optimization for enhanced caffeine degradation in synthetic coffee wastewater using induced cells of *Pseudomonas* sp.: Bioreactor studies. **Journal of Water Process Engineering**, v. 44, n. October, p. 102341, 2021.

SOM, A. M.; ABD WAHAB, A. F. Performance study of dragon fruit foliage as a plantbased coagulant for treatment of palm oil mill effluent from three-phase decanters. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 4290–4300, 2018.

THEODORO, J. D. P.; LENZ, G. F.; ZARA, R. F.; BERGAMASCO, R. Coagulants and Natural Polymers: Perspectives for the Treatment of Water. **Plastic and Polymer Technology (PAPT)**, v. 2, Issue 3, September 2013.

UEDA YAMAGUCHI, N. et al. A review of *Moringa oleifera* seeds in water treatment: Trends and future challenges. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 147, p. 405–420, 2021.

WANG, Y. et al. A study on the feasibility and mechanism of enhanced co-coagulation dissolved air flotation with chitosan-modified microbubbles. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, n. November 2020, p. 101847, 2021.

WEN, Y.; SCHOUPS, G.; VAN DE GIESEN, N. Organic pollution of rivers: Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. **Scientific Reports**, v. 7, n. February, p. 1–9, 2017.

YANG, R. et al. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. **Water Research**, v. 95, n. 2015, p. 59–89, 2016.

YIN, C. Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 9, p. 1437–1444, 2010.

YU, X. et al. Physico-chemical processes. **Water Environment Research**, v. 92, n. 10, p. 1751–1769, 2020.

ZHANG, H. et al. Removal of refractory organics in wastewater by coagulation/flocculation with green chlorine-free coagulants. **Science of the Total Environment**, v. 787, p. 147654, 2021.

ZHAO, C. et al. Application of coagulation/flocculation in oil wastewater treatment: A review. **Science of the Total Environment**, v. 765, p. 142795, 2021.

3 ARTIGO TÉCNICO-CIENTÍFICO

3.1 Introdução

A escassez de água de boa qualidade é um dos problemas enfrentados em vários países nas últimas décadas, sendo um dos fatores que mais contribuem para esta realidade é a poluição dos corpos hídricos pelo despejo de dejetos diversos. As águas residuárias produzidas nas cidades e em atividades agropecuárias representam a principal carga de poluentes orgânicos nos corpos hídricos receptores e o processamento do café, pode ser citado como uma destes contribuintes. Ressalta-se que o Brasil é considerado o maior produtor mundial de café e a maior produção encontra-se no estado de Minas Gerais (PIN et al., 2020; PIRES et al., 2021; WEN; SCHOUPS; VAN DE GIESEN, 2017).

No período de colheita, os grãos do café são separados e tratados por via úmida ou seca, conforme a maturidade e a qualidade dos grãos. No método seco, os grãos de café são secos sob a luz solar depois da lavagem e da retirada das impurezas. Neste sistema gera-se uma pequena quantidade de água residuária, porém, os grãos produzidos são de baixa qualidade (CAMPOS et al., 2021; PIN et al., 2020; SAID et al., 2021).

O processamento via úmida, por sua vez, utiliza água na retirada da casca e da polpa dos grãos de café, produzindo, assim, uma elevada quantidade de efluente, denominado de água residuária do processamento do café (ARC). A ARC é ácida, possui grande concentração de matéria orgânica (açúcar, proteínas, pectinas) e sólidos dissolvidos que ao serem descartadas diretamente em corpos hídricos receptores ocasionam em prejuízos à vida aquática, bem como a saúde humana. Este resíduo pode ocasionar danos aos organismos dos seres humanos, além de provocarem a redução na quantidade de oxigênio necessário pela vida aquática (SAID et al., 2020; SAID et al., 2021).

Devido ao descarte descontrolado da ARC, bem como às características que este resíduo apresenta, torna-se necessário utilizar processos de tratamento que sejam economicamente viáveis e de fácil operação (GOMES DE BARROS et al., 2020). Portanto, uma alternativa favorável, porém ainda pouco explorada, é o uso do processo de coagulação-floculação seguido pela flotação por ar dissolvido (C/FAD) no tratamento da ARC.

O processo conjunto de coagulação-floculação é considerado um método convencional e simples, muito utilizado no tratamento de águas residuárias, uma vez que possibilita a redução da turbidez, matéria orgânica, sólidos em suspensão e demanda química de oxigênio.

No processo de coagulação-floculação, a escolha do coagulante possui extrema importância (DOTTO et al., 2019). Convencionalmente, utilizam-se os sais metálicos, porém estes possuem desvantagens. Assim, há a tendência da continuidade de estudos que objetivem a substituição dos coagulantes metálicos por coagulantes verdes, que são biodegradáveis, possuem baixo custo, podem ser adquiridos com facilidade e são considerados seguros ao ambiente e à saúde humana (PRABHAKARAN; MANIKANDAN; BOOPATHI, 2020; KUSUMA et al., 2021).

Dentre os coagulantes verdes citados na literatura, a moringa provavelmente é uma das mais utilizada. Paralelamente ao uso da moringa, registram-se nos últimos anos iniciativas de pesquisa com uso de várias outras espécies vegetais, como mamona, quiabo, mutamba e a pitaya. Ainda em relação ao uso de coagulantes verdes, registram-se algumas pesquisas que trabalham com o nanopartículas magnéticas e ultrafiltração a ser utilizado em condições modificadas de pH e/ou de salinidade (TRIQUES et al., 2020). A salinidade permite aumentar o desempenho do coagulante, uma vez que o sal contribui para aumentar a força iônica da solução, permitindo aumento da solubilidade da proteína necessária no processo de coagulação (OTHMANI; RASTEIRO; KHADHRAOUI, 2020; SANTOS et al., 2012).

Geralmente os colóides possuem cargas negativas que são neutralizados pelos cátions presentes na solução. Estes cátions estão ligados à superfície das partículas, resultando em uma camada de “nanoescala” de íons carregados positivamente ao redor da partícula, denominado de dupla camada difusa. Ressalta-se que a solução salina contribui para diminuir a distância desta camada, pois a presença dos íons permite o equilíbrio de cargas (BEHBAHANI; RYAN; MCKENZIE, 2021).

A última etapa do tratamento é a separação do material floculado, que pode ser feita principalmente por sedimentação ou flotação, sendo que o último caminho apresenta as vantagens de ser mais rápido do que a sedimentação e possibilitar a mesma eficiência de remoção. O processo de flotação baseia-se em uma técnica de

separação eficiente, confiável e prático para remover os sólidos suspensos e íons dissolvidos das águas residuárias. É necessário introduzir água saturada com ar no tratamento com intuito de promover a suspensão das partículas que foram floclada na etapa anterior. Após a união das bolhas com os flocos, o material “flotado” é deslocado para a superfície da coluna de flotação para ser removido (LIU et al., 2010; LOPES et al., 2020; YU et al., 2020).

Face à todo o exposto, objetivou-se neste artigo, avaliar o processo de coagulação-floculação seguido por flotação por ar dissolvido (C/FAD) utilizando os coagulantes naturais sementes de moringa e cladódio de pitaya no tratamento da ARC, considerando-se diferentes condições de salinidade do meio.

3.2 Material e métodos

Os experimentos foram realizados no Laboratório da Qualidade Ambiental (LQA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa-MG.

3.2.1 Água residuária

A água residuária do processamento do café (ARC) foi coletada na Fazenda “Colibri e Jatobá”, localizada no município de Paula Cândido (MG). A coleta da ARC ocorreu nos meses de maio e de agosto de 2021. As amostras foram armazenadas em galões de plástico e conservadas sob refrigeração a 4°C em câmara fria durante a realização dos experimentos. Na Tabela 3.1 registram-se os valores obtidos na caracterização da ARC afluenta.

Tabela 3.1- Características da água residuária do processamento do café

| Parâmetros | Média |
|---------------------------------------|---------|
| pH | 3,8 |
| Turbidez | 575 |
| Alcalinidade | 34,79 |
| Acidez | 80,08 |
| DQO total | 8650 |
| DQO filtrada | 3455,5 |
| COT filtrado | 50,50 |
| Compostos orgânicos UV ₂₅₄ | 8,5 |
| Potássio | 120,5 |
| Sólidos totais | 7710,67 |
| Sólidos voláteis totais | 7203,33 |

Fonte: Própria autora.

Nota: DQO: demanda química de oxigênio; COT: carbono orgânico total. Todas as variáveis estão em mg L⁻¹ exceto o pH (adimensional) , turbidez (UNT) e a UV₂₅₄ (cm⁻¹).

3.2.2 Obtenção e preparo dos coagulantes

Nos experimentos realizados foram utilizadas sementes de *Moringa oleifera* e o cladódio da *Hylocereus polyrhizus* (pitaya vermelha), coletadas na região Norte do estado de Minas Gerais. Os coagulantes foram dissolvidos separadamente em diferentes proporções (m/v) de cloreto de cálcio (Synth, P.A.), sob agitação constante durante 1 hora. Não houve alteração do Ph do meio.

As sementes de *Moringa oleifera* foram descascadas e secas em estufa de circulação de ar forçado durante 24 horas, a 50° C. Depois da secagem, as sementes foram trituradas em liquidificador, depois peneiradas com intuito de se uniformizar as partículas com tamanhos maiores que 65 mesh. Em seguida, prepararam-se 50 mL de soluções com diferentes doses da semente (0 a 3 g L⁻¹) diluídas em diferentes porcentagens de cloreto de cálcio (0 a 8%) sob agitação constante durante 1 hora. Posteriormente, esta solução foi filtrada duas vezes, primeiramente no filtro de celulose e em seguida em filtro de microfibras de vidro, segundo as orientações de Beltrán-Heredia e Martín (2008).

Os espinhos do cladódio da *Hylocereus polyrhizus* foram removidos e logo após aqueceu-se o cladódio em estufa de circulação de ar forçado durante 24 horas, a 50 °C, e resfriou-se à temperatura ambiente. Em seguida, o produto foi cortado e triturado em liquidificador. Por fim, prepararam-se 50 ml de soluções com diferentes doses do cladódio (0 a 5 g L⁻¹) diluídas em diferentes porcentagens (0 a 8%) de solução de cloreto de cálcio (Synth, P.A.), sob agitação constante durante 1 hora. Ressalta-se que as porcentagens de sal aqui listadas referem-se à relação massa/volume no béquer (50 mL) usado na mistura inicial de coagulante e sal.

3.2.3 Planejamento experimental

No planejamento experimental deste trabalho, avaliou-se a eficiência dos coagulantes na remoção da turbidez e compostos UV₂₅₄ utilizando-se diferentes dosagens dos coagulantes e diferentes porcentagens do cloreto de cálcio, mantendo-se o Ph inicial inalterado. Os ensaios com os coagulantes *Moringa oleifera* e *H. Polyrhizus* foram realizados de maneira independente. O delineamento composto central rotacional (DCCR) foi utilizado com intuito de se otimizar as variáveis dose dos coagulantes e salinidade.

O DCCR fundamentou-se em um fatorial 2² mais quatro pontos axiais e seis pontos centrais, totalizando quatorze ensaios que foram feitos aleatoriamente. Os níveis altos e baixos dos fatores foram determinados após a realização de testes preliminares. Os níveis de dosagem dos coagulantes e do sal são apresentados na tabela 3.2 para *Moringa Oleifera* e na tabela 3.3 para *Hylocereus polyrhizus*.

Tabela 3.2 - Níveis codificados e reais das variáveis independentes no DCCR para *Moringa Oleifera*

| Variáveis independentes | Níveis das variáveis independentes | | | | |
|--|------------------------------------|------|------|------|------|
| | -α | -1 | 0 | +1 | +α |
| Dose do coagulante (g. L ⁻¹) | 0,00 | 4,30 | 1,50 | 2,56 | 3,00 |
| Dose do sal (%) | 0,00 | 1,17 | 4,00 | 6,82 | 8,00 |

Fonte: Própria autora.

Tabela 3.3 - Níveis codificados e reais das variáveis independentes no DCCR para *Hylocereus polyrhizus*

| Variáveis independentes | Níveis das variáveis independentes | | | | |
|--|------------------------------------|------|------|------|------------|
| | - α | -1 | 0 | +1 | + α |
| Dose do coagulante (g. L ⁻¹) | 0,00 | 0,70 | 2,50 | 4,26 | 5,00 |
| Dose do sal (%) | 0,00 | 1,17 | 4,00 | 6,82 | 8,0 |

Fonte: Própria autora.

O cálculo de α foi realizado conforme o número de variáveis independentes ($k=2$), por meio da equação 3.1:

$$\alpha = (2^k)^{1/4} = 1,414 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Os valores para as corridas realizadas (14 para cada coagulante) são apresentados nas tabelas 3.4 e 3.5. Ressalta-se que estas corridas foram executadas aleatoriamente.

Tabela 3.4 - Níveis reais dos fatores estudados para a *Moringa oleifera*

| Ensaio | Valores codificados | | Valores reais | |
|--------|---------------------|----------|---|--------------|
| | Dose coagulante | Dose sal | Dose coagulante (g L ⁻¹) | Dose sal (%) |
| 1 | -1 | -1 | 0,43 | 1,17 |
| 2 | -1 | 1 | 0,43 | 6,82 |
| 3 | 1 | -1 | 2,50 | 1,17 |
| 4 | 1 | 1 | 2,50 | 6,82 |
| 5 | 0 | -1,414 | 1,50 | 0,00 |
| 6 | 0 | 1,414 | 1,50 | 8,00 |
| 7 | -1,414 | 0 | 0,00 | 4,00 |
| 8 | 1,414 | 0 | 3,00 | 4,00 |
| 9 | 0 | 0 | 1,50 | 4,00 |
| 10 | 0 | 0 | 1,50 | 4,00 |
| 11 | 0 | 0 | 1,50 | 4,00 |
| 12 | 0 | 0 | 1,50 | 4,00 |
| 13 | 0 | 0 | 1,50 | 4,00 |
| 14 | 0 | 0 | 1,50 | 4,00 |

Fonte: Própria autora.

Tabela 3.5 - Níveis reais dos fatores estudados para a *Hylocereus polyrhizus*

| Ensaio | Valores codificados | | Valores reais | |
|--------|---------------------|----------|--------------------------------------|--------------|
| | Dose coagulante | Dose sal | Dose coagulante (g L ⁻¹) | Dose sal (%) |
| 1 | -1 | -1 | 0,73 | 1,17 |
| 2 | -1 | 1 | 0,73 | 6,82 |
| 3 | 1 | -1 | 4,26 | 1,17 |
| 4 | 1 | 1 | 4,26 | 6,82 |
| 5 | 0 | -1,414 | 2,50 | 0,00 |
| 6 | 0 | 1,414 | 2,50 | 8,00 |
| 7 | -1,414 | 0 | -0,00 | 4,00 |
| 8 | 1,414 | 0 | 5,00 | 4,00 |
| 9 | 0 | 0 | 2,50 | 4,00 |
| 10 | 0 | 0 | 2,50 | 4,00 |
| 11 | 0 | 0 | 2,50 | 4,00 |
| 12 | 0 | 0 | 2,50 | 4,00 |
| 13 | 0 | 0 | 2,50 | 4,00 |
| 14 | 0 | 0 | 2,50 | 4,00 |

Fonte: Própria autora.

3.2.4 Ensaios de coagulação, floculação e flotação

3.2.4.1 Coagulação-floculação

Utilizou-se o equipamento *jar test* (modelo 218-2 LDB, Ethik Technology) para a realização das etapas de mistura rápida e mistura lenta. A velocidade e tempo de mistura foram determinadas conforme os testes preliminares realizados.

No início do processo, 1 L da ARC foi adicionada aos béqueres de 2 L do equipamento. Em seguida, iniciou-se a mistura rápida com uma agitação de 400 rpm durante 1 minuto, sendo que nesta etapa foi adicionado o coagulante dissolvido na solução salina de cloreto de cálcio. As dosagens do coagulante e do sal foram definidas por meio do planejamento estatístico. Ressalta-se que o pH não foi ajustado, portanto trabalhou-se com o pH natural da ARC, equivalente à 3,8.

Logo após a coagulação, iniciou-se a floculação. Para isso, diminuiu-se a agitação para 150 rpm por 15 minutos. Posteriormente, desligou-se o equipamento e transferiu-se lentamente o conteúdo, do béquer para a coluna de flotação, de maneira a preservar-se os flocos formados.

3.2.4.2 Flotação

Na etapa de separação dos flocos, com a flotação por ar dissolvido (FAD), utilizou-se um equipamento “flotatest” (218 – 3 Flow, Nova Ética), formado por um compressor, uma câmara de saturação e uma coluna de flotação, adaptado por Pereira (2017).

As condições operacionais foram determinadas por meio dos testes preliminares, sendo os parâmetros operacionais da FAD apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6- Condições operacionais na etapa de flotação por ar dissolvido

| Parâmetros operacionais | Valores |
|--|----------------|
| Pressão de saturação (bar) | 6 |
| Razão de recirculação (%) | 30 |
| Velocidade de flotação (cm min ⁻¹) | 8 |
| Tempo de flotação (min) | 15 |
| Tempo de saturação (min) | 2 |

Fonte: Própria autora.

No início do processo de flotação, preencheu-se com 2 L de água de abastecimento a câmara de saturação. Em seguida, ligou-se o compressor e injetou-se ar no interior da câmara de saturação, atingindo uma pressão de 6 bar. Esta pressão permaneceu na câmara de saturação por 2 minutos e logo após, abriu-se a válvula responsável por injetar água saturada na coluna de flotação. A razão de recirculação determinada foi 30% dos 2 L da câmara de saturação. Após este valor ser atingido, fechou-se a válvula e aguardaram-se 15 minutos para ocorrer o processo de flotação. Depois, coletou-se 0,5 litro da parte inferior da coluna de flotação com intuito de realizarem-se as análises das variáveis turbidez e compostos UV₂₅₄.

3.2.5 Determinações analíticas

As análises das variáveis-resposta (turbidez e compostos UV₂₅₄) foram realizadas conforme as indicações de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Todas as variáveis foram medidas antes e após o tratamento da ARC com intuito de se obter os valores removidos e a eficiência de remoção.

A análise da turbidez foi realizada com uso de um turbidímetro portátil (Modelo ORION AQ3010). Para a determinação dos compostos UV₂₅₄, foi necessário filtrar a amostra, após o tratamento, usando-se filtros de microfibras de vidro de 1,00 µm de porosidade e 45 mm de diâmetro. Segundo Muniz (2018), este processo é necessário para que haja a redução das variações ocasionadas pela presença de partículas em suspensão. Em seguida, fez-se a leitura da amostra usando uma espectrofotômetro

(Modelo Hach DR 6000) no comprimento de onda de 254 nm utilizando uma cubeta de quartzo de 1 cm. A equação 3.2 foi usada para calcular a absorbância 254 nm.

$$UV_{254} = \frac{A}{b} * D \quad (\text{Eq. 3.2})$$

visto que UV_{254} refere-se a absorbância UV em cm^{-1} ; b é o caminho óptico em cm; A corresponde à média da absorbância medida e D é o fator de diluição.

Para calcular-se a eficiência de remoção (ε) das variáveis (turbidez e UV_{254}) utilizou-se a equação proposta por Couto et al. (2004). Para calcular a remoção absoluta destes parâmetros, utilizou-se a equação recomendada por Muniz (2018).

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{XV}{X_0V_0}\right) * 100$$

(Eq 3.3)

$$R = X_0V_0 - XV \quad (\text{Eq 3.4})$$

em que ε corresponde é a eficiência de remoção em %; R refere-se a remoção dos parâmetros turbidez (UNT) e compostos UV_{254} em (cm^{-1}) no final do tratamento da ARC. O V é o volume em (L) da ARC no final do processo, tendo em vista o volume recirculado no processo de flotação (30%); X_0 refere-se a turbidez e compostos UV_{254} no início do tratamento e V_0 é o volume em L de ARC que será tratado no início do tratamento.

3.2.6 Análise estatística

Foram realizadas 14 ensaios para cada coagulante, sendo 6 destes referentes às repetições no ponto central, conforme citado anteriormente. As variáveis-resposta usadas na Análise de Variância foram a turbidez removida e compostos UV_{254} removidos, desconsiderando-se o fator de diluição, que no ítem 3.5.2 foi aplicado.

Para o cálculo da turbidez e de compostos UV_{254} removidos, foram considerados os valores médios das 3 leituras efetuadas para cada um dos 14 ensaios, para minimizarem-se os erros. Após a obtenção dos resultados, os referentes aos pontos centrais, que eram repetições, foram submetidos à testes de outlier ($\alpha =$

5%). Os ensaios centrais detectados como outliers não foram consideradas na ANOVA.

Para a obtenção dos níveis ótimos ou promissores, utilizou-se o programa Design Experts, para encontrar-se o modelo matemático que associasse os parâmetros estudados removidos, bem como a dosagem do coagulante, dose do sal e o ponto ótimo de remoção. Por fim foi feita a validação dos modelos por meio de três ensaios independentes.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 *Moringa oleifera*

a. Resultados das corridas experimentais

Na tabela 3.7 estão apresentados os resultados obtidos no planejamento experimental na remoção da turbidez e dos compostos UV₂₅₄ utilizando o coagulante natural *Moringa oleifera*.

Tabela 3.7- Valores da eficiência de remoção utilizando as sementes de *Moringa oleifera*

| Ensaio | Dose sal (%) | Dose coagulante (g L⁻¹) | Remoção de Turbidez (%) | Remoção Compostos UV₂₅₄ (%) |
|---------------|---------------------|---|--------------------------------|---|
| 1 | 1,17 | 0,43 | Não houve remoção | 56,70 |
| 2 | 6,82 | 0,43 | 81,65 | 84,18 |
| 3 | 1,17 | 2,56 | 47,53 | 73,64 |
| 4 | 6,82 | 2,56 | 73,33 | 71,76 |
| 5 | 0,00 | 1,50 | 11,12 | 68,00 |
| 6 | 8,00 | 1,50 | 45,24 | 72,51 |
| 7 | 4,00 | 0,00 | 61,29 | 66,11 |
| 8 | 4,00 | 3,00 | 60,14 | 63,67 |
| 9 | 4,00 | 1,50 | 73,05 | 69,88 |
| 10 | 4,00 | 1,50 | 71,61 | 62,35 |
| 11 | 4,00 | 1,50 | 77,92 | 63,10 |
| 12 | 4,00 | 1,50 | 82,22 | 59,34 |
| 13 | 4,00 | 1,50 | 73,05 | 58,02 |
| 14 | 4,00 | 1,50 | 81,65 | 71,76 |

Fonte: Própria autora.

Ressalta-se que todas as corridas foram realizadas aleatoriamente. Em relação à tabela, observa-se que a eficiência de remoção da turbidez variou entre 0% e 82,22% e para os compostos UV₂₅₄ variou entre 56,70% e 84,18%. As corridas sem coagulantes apresentaram eficiência de remoção de 61,29% para a turbidez e para compostos UV₂₅₄ foi 66,11%. Já para as corridas sem a dose de salinidade as eficiências de remoção foram 11,12% para turbidez e 68% para os compostos UV₂₅₄.

b. Modelagem do processo com uso de *Moringa oleifera* considerando-se a turbidez como variável resposta

Para o ensaio com *Moringa oleifera*, foram obtidos modelos satisfatórios considerando-se os efeitos quadráticos e lineares, no que se refere ao R² e ao R² ajustado. Contudo o valor do R² predito obtido foi muito pequeno, igual a 0,06.

Assim, optou-se pelo ajuste de um modelo cúbico reduzido. Na Tabela 3.8 é apresentada a análise de variância (ANOVA) dos modelos propostos referente à remoção da turbidez usando as sementes *Moringa oleifera* em condições de diferentes níveis de salinidade.

Tabela 3.8 - ANOVA do modelo de regressão referente a remoção da turbidez usando *Moringa oleifera*

| Fonte | Soma dos quadrados | G.L | Quadrado médio | F- valor | p-valor | |
|------------------|--------------------|-----|----------------|----------|----------|-------------------|
| Modelo | 1,636E +0,05 | 7 | 23371,02 | 109,20 | < 0,0001 | significativo |
| A-sal | 7080,50 | 1 | 7080,50 | 33,08 | 0,0022 | |
| B-coagulante | 8,00 | 1 | 8,00 | 0,0374 | 0,8553 | |
| AB | 24025,00 | 1 | 24025,00 | 112,25 | 0,0001 | |
| A ² | 53820,97 | 1 | 53820,97 | 251,47 | < 0,0001 | |
| B ² | 6780,48 | 1 | 6780,48 | 31,68 | 0,0025 | |
| A ² B | 8295,84 | 1 | 8295,84 | 38,76 | 0,0016 | |
| AB ² | 12941,05 | 1 | 12941,05 | 60,47 | 0,0006 | |
| Resíduo | 1070,12 | 5 | 214,02 | | | |
| Falta de ajuste | 105,32 | 1 | 105,32 | 0,4366 | 0,5449 | não significativo |
| Erro puro | 964,80 | 4 | 241,20 | | | |
| Total | 1,647E+0,5 | 12 | | | | |

Fonte: Própria autora.

Por meio da tabela, percebe-se que o valor F do Modelo encontrado é 109,20, ou seja, o modelo é significativo, nível de significância 95%. Ressalta-se que valores de p-valor menor que 0,05 indicam que os termos do modelo são significativos. Dessa maneira, observa-se que A, AB, A², B², A²B, AB² são significativos. Como mostrado na tabela, o valor da falta de ajuste foi 0,44, isso implica que a falta de ajuste é não significativa, em relação ao erro puro.

Os valores maiores que 0,05 indicam que os termos do modelo são não significativos. Contudo, o termo B (efeito linear da dose) foi mantido no modelo por questão de hierarquia. Na tabela 3.9 visualizam-se os parâmetros que aferem a qualidade do ajuste do modelo.

Tabela 3.9 - Dados do modelo ajustado para *Moringa oleifera*

| Dados | Valor |
|--|---------|
| R ² | 0,9935 |
| R ² ajustado (R ² adj) | 0,9844 |
| R ² predito (R ² pred) | 0,9499 |
| <i>Adequate precision</i> | 34,8543 |

Fonte: Própria autora.

Na tabela 3.9 são visualizados os coeficientes de determinação (R²), de determinação ajustado (R² adj) e o R² predito (R² pred). Observa-se que o valor de R² pred foi 0,9499, o mesmo encontra-se em concordância com o R² adj de 0,9844, uma vez que a diferença é menor do que 0,2. Sendo assim, é possível afirmar que os modelos estão bem ajustados, uma vez que o valor de R² foi maior que 0,8 (NAJIB et al., 2017). A *adequate precision* maior que 4 representa um sinal adequado, o que mostra uma discriminação adequada do modelo (ZHANG et al., 2018).

O modelo final de terceira ordem, considerando-se as variáveis não codificadas (naturais) é apresentado na Equação 3.5.

$$\text{Turbidez Removida (UNT)} = -380,50920 + 289,52378 \cdot \text{Sal} + 609,86803 \cdot \text{Coagulante} - 162,35489 \cdot \text{Sal} \cdot \text{Coagulante} - 22,38226 \cdot \text{Sal}^2 - 128,80876 \cdot \text{Coagulante}^2 + 7,59120 \cdot \text{Sal}^2 \cdot \text{Coagulante} + 25,26544 \cdot \text{Sal} \cdot \text{Coagulante}^2 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

c. Validação dos dados

Realizaram-se três novas corridas independentes para validação do modelo. Os valores obtidos por meio do modelo de regressão foram comparados com obtidos experimentalmente. Os resultados de validação são representados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Resultados de validação para turbidez removida usando a *Moringa oleifera*

| Variáveis | | Turbidez Removida (UNT) | | Relação |
|-----------|----------------|-------------------------|---------|---------|
| Sal (%) | Coagulante (g) | Observada | Predita | O/P |
| 5,33 | 1,27 | 433 | 485,66 | 0,89 |
| 4,00 | 3,00 | 428 | 415,46 | 1,03 |
| 2,00 | 0,5 | 228 | 247,20 | 0,92 |

Fonte: Própria autora.

Percebe-se que os valores encontrados nos ensaios experimentais estão próximos a 1, portanto o modelo é considerado válido para fins preditivos. Dessa maneira, os resultados apresentados foram satisfatórios para prever a remoção da turbidez usando as sementes de *Moringa oleifera*.

d. Modelagem do processo com uso de *Moringa oleifera* considerando-se os compostos uv_{254} como variável resposta

Considerando-se a variável-resposta compostos UV_{254} removidos, foram obtidos modelos satisfatórios tendo em vista os efeitos quadráticos e lineares, além da interação, no que se refere ao R^2 e ao R^2 ajustado. Contudo o valor de R^2 predito obtido foi 0,0617. Ao contrário da variável turbidez, mesmo usando-se um modelo cúbico reduzido ou realizando-se transformações na resposta, não foram obtidos R^2 preditos satisfatórios. Ainda assim, propôs-se a ANOVA e a aferição da qualidade do modelo foi feita considerando-se os três testes de validação.

Tabela 3.11 - Análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão referente à remoção dos compostos UV₂₅₄ por *Moringa oleifera*

| Fonte | Soma dos quadrados | G.L | Quadrado médio | F- valor | p-valor | |
|-----------------|--------------------|-----|----------------|----------|---------|-------------------|
| Modelo | 1,64 | 5 | 0,3286 | 6,74 | 0,0189 | significativo |
| A-sal | 0,3610 | 1 | 0,3610 | 7,41 | 0,0346 | |
| B-coagulante | 0,0004 | 1 | 0,0004 | 0,0081 | 0,9312 | |
| AB | 0,6084 | 1 | 0,6084 | 12,48 | 0,0123 | |
| A ² | 0,6026 | 1 | 0,6026 | 12,36 | 0,0126 | |
| B ² | 0,1730 | 1 | 0,1730 | 3,55 | 0,1085 | |
| Resíduo | 0,2925 | 6 | 0,0487 | | | |
| Falta de ajuste | 0,2430 | 3 | 0,0810 | 4,91 | 0,1119 | não significativo |
| Erro puro | 0,0495 | 3 | 0,0165 | | | |
| Total | 1,94 | 11 | | | | |

Fonte: Própria autora.

Como observado, o valor de F do Modelo foi 6,74 indicando que o modelo é significativo, a 5% de significância. Os valores do modelo que possuem ($p \leq 0,05$) são termos significativos. Sendo assim, os termos A, AB A² são significativos. Observa-se também que a falta de ajuste foi não significativa ($p > 0,05$), portanto os modelos ajustaram-se bem aos dados observados. Os termo B² e B não são significativos, tendo então sido feita a remoção do efeito quadrático da dose. O efeito linear foi mantido por questão de hierarquia dos termos. Na tabela 3.12 visualizam-se os parâmetros que aferem a qualidade do ajuste do modelo.

Tabela 3.12 - Dados dos modelos ajustados para *Moringa oleifera*

| Dados | Valor |
|--|--------|
| R ² | 0,8489 |
| R ² ajustado (R ² adj) | 0,7230 |
| R ² predito (R ² pred) | 0,0617 |
| <i>Adequate precision</i> | 7,7174 |

Fonte: Própria autora.

Observa-se que o valor de R² pred é 0,0617, este não é próximo do valor do R² ajustado de 0,7230, como era esperado, uma vez que a diferença é maior que 0,2. Isso pode estar relacionado à redução do modelo, transformação de respostas ou valores discrepantes. Em relação à *adequate precision* com valor de 7,7174 indicando uma discriminação adequada do modelo, conforme as orientações de Zhang et al. (2018).

A equação 3.6 representa o modelo polinomial de segunda ordem que relaciona os compostos UV₂₅₄ removidos em função da dosagem da *Moringa oleifera* e a salinidade.

$$\text{Compostos UV}_{254} \text{ removidos (cm}^{-1}\text{)} = +6,26479 - 0,03679 \cdot \text{Sal} + 0,088109 \cdot \text{Coagulante} - 0,129978 \cdot \text{Sal} \cdot \text{Coagulante} + 0,038358 \cdot \text{Sal}^2 + 0,146143 \cdot \text{Coagulante}^2$$

(Eq. 3.6)

e. Validação dos dados

Três novas corridas independentes foram realizadas para a validação do modelo. Os valores obtidos por meio do modelo foram comparados com os valores

obtidos experimentalmente. Os resultados de validação para remoção dos compostos UV₂₅₄ usando *Moringa oleifera* estão sendo apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Resultados dos ensaios de validação para remoção dos compostos UV₂₅₄ usando *Moringa oleifera*

| Variáveis | | Compostos Uv ₂₅₄ removidos (cm ⁻¹) | | Relação |
|-----------|----------------|---|---------|---------|
| Sal (%) | Coagulante (g) | Observada | Predito | O/P |
| 8,0 | 0,0 | 7,00 | 8,42 | 0,83 |
| 4,0 | 2,0 | 6,70 | 6,45 | 1,03 |
| 2,0 | 2,5 | 6,50 | 6,82 | 0,95 |

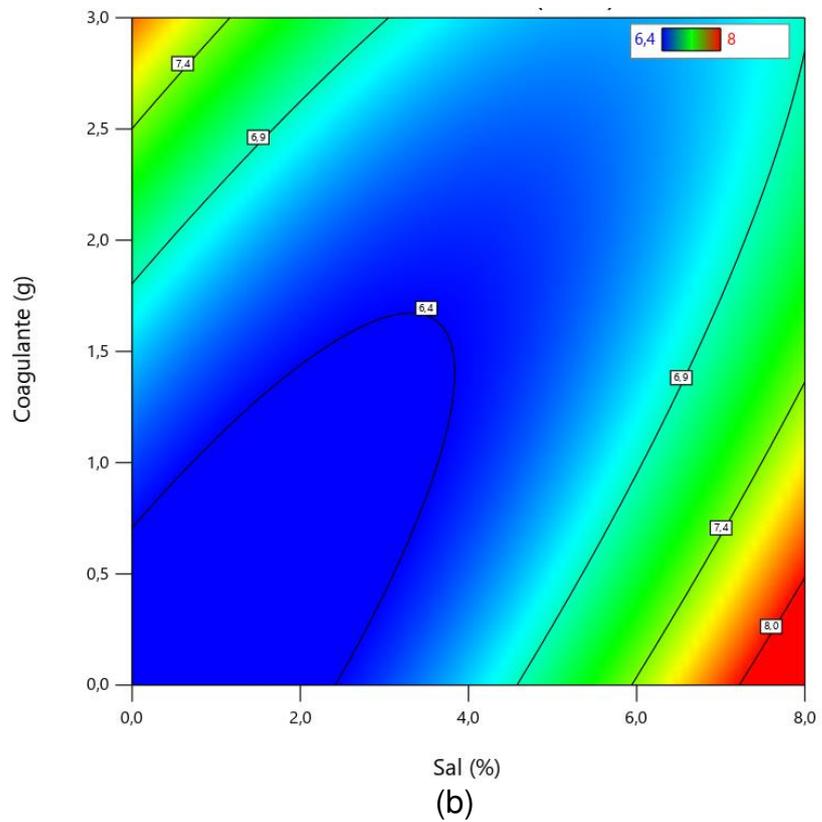
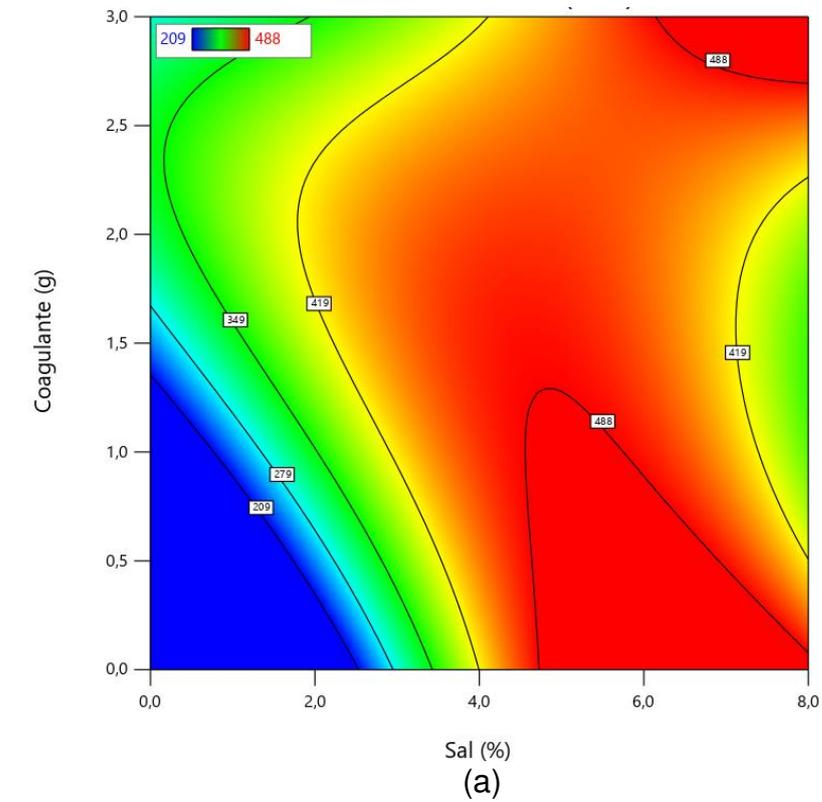
Fonte: Própria autora.

Observa-se por meio dos resultados mostrados na Tabela 3.13 que os modelos matemáticos foram eficientes para prever de forma satisfatória a remoção dos compostos UV₂₅₄, pois em todos os pontos testados, a relação encontrada pelos modelos dos valores previstos com os resultados obtidos experimentalmente estão próximas a 1. Sendo assim, percebe-se que apesar do R² predito encontrado ter sido insatisfatório, a validação confirmou a possibilidade de utilização do modelo para fins preditos.

f. Otimização do processo considerando-se as duas variáveis-resposta

Na figura 3.1 são visualizados os gráficos de contorno que retratam como os modelos desenvolvidos predizem os valores de turbidez (a) e dos compostos UV₂₅₄ (b).

Figura 3.1 – Gráfico de contorno mostrando o efeitos da coagulação com sementes de *Moringa oleifera* na remoção da turbidez (a) e dos compostos UV₂₅₄ (b)



Fonte: Própria autora.

Ao analisar-se a figura 3.1 (a) percebe-se a eficiência de remoção da turbidez é fortemente dependente da salinidade do meio, pois verifica-se que uma remoção na turbidez de 488 UNT (80%) com uma elevada dosagem de sal e praticamente nenhuma dose de coagulante. Lo Monaco et al. (2013) verificaram que ao utilizarem soluções salinas de cloreto de sódio e cloreto de potássio no tratamento do esgoto sanitário, não houve remoção da turbidez deste efluente, independente da concentração usada. Porém, os autores ao utilizarem o hidróxido de cálcio, verificaram eficiência na remoção da turbidez na faixa de 80 a 85%, ressaltando que o cálcio potencializou as propriedades coagulantes da semente de *Moringa oleifera*.

Okuda et al. (1999) afirmam que cátions bivalentes, como cloreto de cálcio, são adsorvidos ao componente ativo da coagulação (proteínas), possibilitam a ligação entre suas moléculas, formando uma matéria insolúvel conhecida como estruturas em rede, responsáveis em capturar os sólidos suspensos presentes nos efluentes, contribuindo para remoção da turbidez. Os autores também relatam que como o componente ativo para a coagulação da moringa é a proteína, na qual a solubilidade da mesma é aumentada com a concentração do sal, portanto o aumento da solubilidade do composto ativo, aumenta a eficiência do íon coagulante.

Ressalta-se que o aumento da concentração do sal, promove uma maior agregação de partículas presentes na água residuária, uma vez que ocorre o aumento da força iônica devido à compressão da dupla camada difusa que reduz a distância entre os íons (BEHBAHANI; RYAN; MCKENZIE, 2021).

Observa-se também elevada remoção com elevada concentração de sal e elevada concentração de coagulante. Matos et al. (2007), ao trabalhar com sementes de *Moringa oleifera* no tratamento da ARC, atingiram menores valores de turbidez em doses intermediárias (10 mL L^{-1}) dissolvidas em água destilada e um baixo valor de pH.

Teixeira et al. (2021) trabalharam no tratamento da vinhaça usando o extrato das sementes de *Moringa oleifera* em solução salina de cloreto de cálcio. Ressalta-se que a vinhaça possui características físico-químicas, como pH, matéria orgânica e concentração de potássio. bastante semelhantes com a ARC. Os autores verificaram uma eficiência de 79,1% na remoção da turbidez, valor semelhante aos observados na presente pesquisa. Os autores afirmam que devido às elevadas eficiências na clarificação das impurezas, as sementes de *Moringa oleifera* apresentam atividades semelhantes ao polímero sintético ao utilizar a concentração de 100 mg L^{-1} .

Novita et al. (2019) afirmam que as partículas das sementes de moringa, como são catiônicas são capazes de absorver íons negativos presentes no coloide, neutralizando-os. Portanto, é possível reduzir a turbidez da ARC utilizando este coagulante natural.

Conforme é observado na figura 3.1 (a) nas corridas experimentais realizadas sem a dosagem do sal e sem a dose das sementes de *Moringa oleifera*, não ocorre remoção da turbidez, portanto, evidencia-se que pequenas doses de coagulante e sal ao mesmo tempo não são suficientes na remoção deste parâmetro.

Em relação à figura 3.1(b) observa-se uma remoção de 8 cm^{-1} de compostos UV_{254} , correspondente à 90% eficiência de remoção. Ressalta-se que essa elevada remoção ocorreu em concentrações elevadas de sal e pequena dose de sementes de *Moringa oleifera*, sendo assim, percebe-se que a dosagem do coagulante exerceu pouca influência na remoção dos compostos UV_{254} . Baptista et al. (2015) ressaltam que este coagulante é um composto orgânico, portanto doses elevadas podem contribuir para aumentar a concentração de compostos UV_{254} no efluente.

A *Moringa oleifera* possui uso limitado, ou seja, o aumento da concentração deste coagulante provoca uma maior quantidade de matéria orgânica no resíduo, o que se torna prejudicial ao tratamento de água (BAPTISTA et al., 2015). Isso pode ter contribuído para a baixa influência do coagulante na remoção dos compostos UV_{254} , quando usadas elevadas doses.

Owodunni e Ismail (2021) afirmam extrair os coagulantes em soluções salinas é viável, uma vez que o aumento da concentração de sais contribui para uma maior extração do agente coagulante, isso pode explicar o fato de elevadas dosagens de sal aumentar a remoção dos compostos UV_{254} .

Carvalho et al. (2016) observaram que o cloreto de cálcio forma com as proteínas das sementes de *Moringa oleifera* uma estrutura com as características de uma rede, responsáveis em unir as partículas que encontram-se em suspensão na água residuária, permitindo assim a remoção destes poluentes por meio do tratamento.

A elevada eficiência de 90% na remoção dos compostos UV_{254} , pode estar relacionada aos materiais aromáticos que este parâmetro apresenta e que podem ser removidos com mais facilidade e eficiência no processo de coagulação-floculação (BAPTISTA et al., 2017).

3.3.2 *Hylocereus polyrhizus*

a. Resultados das corridas experimentais

Os resultados das corridas experimentais na remoção da turbidez e dos compostos UV₂₅₄ verificam-se na tabela 3.14 usando o coagulante natural *Hylocereus polyrhizus*.

Todos os ensaios foram realizados aleatoriamente. Percebe-se na tabela, que a eficiência de remoção da turbidez variou entre 9,64% e 61,85% e para os compostos UV₂₅₄ variou entre 36 % e 63,43%. As corridas que não tiverem a adição de coagulante apresentaram eficiência de remoção de 52,37% para turbidez e 61,14% para compostos UV₂₅₄. Os ensaios nos quais não houve adição de sal apresentaram eficiência de remoção de 9,64% para turbidez e 49,71% para compostos UV₂₅₄.

Tabela 3.14 - Valores da eficiência de remoção utilizando do cladódio de *Hylocereus polyrhizus*

| Ensaio | Dose sal (%) | Dose coagulante (g L⁻¹) | Remoção de Turbidez (%) | Remoção Compostos UV₂₅₄ (%) |
|---------------|---------------------|---|--------------------------------|---|
| 1 | 1,17 | 0,73 | 25,89 | 54,29 |
| 2 | 6,82 | 0,73 | 49,17 | 36,00 |
| 3 | 1,17 | 4,26 | 20,47 | 58,86 |
| 4 | 6,82 | 4,26 | 56,71 | 63,43 |
| 5 | 0,00 | 2,50 | 9,64 | 49,71 |
| 6 | 8,00 | 2,50 | 52,70 | 58,86 |
| 7 | 4,00 | 0,00 | 52,37 | 61,14 |
| 8 | 4,00 | 5,00 | 60,56 | 52,00 |
| 9 | 4,00 | 2,50 | 57,45 | 61,14 |
| 10 | 4,00 | 2,50 | 61,85 | 56,57 |
| 11 | 4,00 | 2,50 | 49,64 | 49,71 |
| 12 | 4,00 | 2,50 | 50,28 | 52,00 |
| 13 | 4,00 | 2,50 | 59,76 | 52,00 |
| 14 | 4,00 | 2,50 | 60,23 | 49,71 |

Fonte: Própria autora.

b. Modelagem do processo com uso de *Hylocereus polyrhizus* considerando-se a turbidez como variável resposta

Na Tabela 3.15 visualizam-se os dados da análise de variância (ANOVA) dos modelos propostos relacionados à remoção da turbidez utilizando o cladódio da *Hylocereus polyrhizus* em condições de diferentes níveis de salinidade.

Tabela 3.15 - Dados do modelo ajustado referente a remoção da turbidez utilizando *Hylocereus polyrhizus*

| Fonte | Soma dos quadrados | G.L | Quadrado médio | F- valor | p-valor | |
|-----------------|--------------------|-----|----------------|----------|----------|-------------------|
| Modelo | 61770,86 | 4 | 15442,72 | 52,38 | <0,0001 | significativo |
| A-sal | 33385,43 | 1 | 33385,43 | 113,24 | <0,0001 | |
| B-coagulante | 438,86 | 1 | 438,86 | 1,49 | 0,2619 | |
| A ² | 27929,37 | 1 | 27929,37 | 94,73 | < 0,0001 | |
| B ² | 1405,45 | 1 | 1405,45 | 4,77 | 0,0653 | |
| Resíduo | 2063,80 | 7 | 294,83 | | | |
| Falta de ajuste | 1879,05 | 4 | 469,76 | 7,63 | 0,0634 | não significativo |
| Erro puro | 184,75 | 3 | 61,58 | | | |
| Total | 63834,67 | 11 | | | | |

Fonte: Própria autora.

O valor F maior e p menor indicam uma elevada significância do coeficiente correspondente (ZHANG et al.,2018), os termos A e A² são termos significativos (p≤ 0,05). A falta de ajuste foi não significativa (p > 0,05), indicando que o modelo ajustou-se aos dados. O termo B² apresentou p-valor de 0,0653, mas foi mantido no modelo, dada sua importância na explicação física do processo.

Na tabela 3.16 são apresentados os dados de qualidade de ajuste obtidos pela Análise de Variância (ANOVA).

Tabela 3.16 - Dados dos modelos ajustados para *Hylocereus polyrhizus*

| Dados | Valor |
|--|--------------|
| R ² | 0,9677 |
| R ² ajustado (R ₂ adj) | 0,9492 |
| R ² predito (R ₂ pred) | 0,8641 |
| <i>Adequate precision</i> | 20,1645 |

Fonte: Própria autora.

Modelos que apresentam R² maior que 80% são classificados como bem ajustados e uma diferença menor que 0,2 entre o R² adj e R² pred indica que os modelos são capazes de prever respostas futuras. A *Adequate precision* maior que 4 representa um sinal adequado, o que mostra uma discriminação adequada do modelo (NAJIB et al., 2017; ZHANG et al., 2018).

A equação 3.7 representa o modelo polinomial de segunda ordem que relaciona com a turbidez removida em função da dosagem da *Hylocereus polyrhizus* e a salinidade.

$$\text{Turbidez removida (UNT)} = +253,35964 + 88,90575 \cdot \text{Sal} + 27,89867 \cdot \text{Coagulante} - 8,25805 \cdot \text{Sal}^2 - 4,74183 \cdot \text{Coagulante}^2 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

c. Validação dos dados

Três novos ensaios independentes foram realizados com intuito de validar o modelo. Os valores encontrados por meio do modelo de regressão foram comparados com os encontrados experimentalmente. Os resultados de validação são representados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Resultados validação usando *Hylocereus polyrhizus* na remoção da turbidez

| Variáveis | | Turbidez Removida (UNT) | | Relação |
|-----------|----------------|-------------------------|---------|---------|
| Sal (%) | Coagulante (g) | Observada | Predito | O/P |
| 5,57 | 5,0 | 467 | 513,3 | 0,91 |
| 2,3 | 4,0 | 385 | 449,8 | 0,86 |
| 5,0 | 2,0 | 453 | 528,2 | 0,86 |

Fonte: Própria autora.

Ressalta-se que os valores obtidos nas corridas experimentais estão próximos a 1, portanto o modelo é considerado válido para fins preditivos.

d. Modelagem do processo com uso de *Hylocereus polyrhizus* considerando-se os compostos UV₂₅₄ como variável resposta

A Tabela 3.18 refere-se aos dados da análise de variância (ANOVA) dos modelos ajustados para a remoção dos compostos UV₂₅₄ utilizando o cladódio da *Hylocereus polyrhizus* em condições de diferentes níveis de salinidade.

Tabela 3.18 - ANOVA do modelo ajustado referente a remoção dos compostos UV₂₅₄ por *Hylocereus polyrhizus*

| Fonte | Soma dos quadrados | G.L | Quadrado médio | F- valor | p-valor | |
|------------------|--------------------|-----|----------------|----------|---------|-------------------|
| Modelo | 1,06 | 7 | 0,1514 | 20,19 | 0,0057 | significativo |
| A-sal | 0,0800 | 1 | 0,0800 | 10,67 | 0,0309 | |
| B-coagulante | 0,0800 | 1 | 0,0800 | 10,67 | 0,0309 | |
| AB | 0,2500 | 1 | 0,2500 | 33,33 | 0,0045 | |
| A ² | 0,0160 | 1 | 0,0160 | 2,13 | 0,2179 | |
| B ² | 0,0640 | 1 | 0,0640 | 8,53 | 0,0432 | |
| A ² B | 0,4830 | 1 | 0,4830 | 64,39 | 0,0013 | |
| AB ² | 0,1699 | 1 | 0,1699 | 22,64 | 0,0089 | |
| Resíduo | 0,0300 | 4 | 0,0075 | | | |
| Falta de ajuste | 0,0200 | 1 | 0,0200 | 6,00 | 0,0917 | não significativo |
| Erro puro | 0,0100 | 3 | 0,0033 | | | |
| Total | 1,091 | 11 | | | | |

Fonte: Própria autora.

Observou-se que o modelo foi significativo a 95% de probabilidade. Os termos A, B e AB, B², A²B, AB² são significativos ($p \leq 0,05$). A falta de ajuste é não significativa ($p > 0,05$), portanto os modelos ajustam bem aos dados.

Na tabela 3.19 verificam-se os dados ajustados do modelo, obtidos pela Análise de Variância (ANOVA).

Tabela 3.19- Dados dos modelos ajustados para *Hylocereus polyrhizus*

| Dados | Valor |
|--|---------|
| R ² | 0,9725 |
| R ² ajustado (R ² adj) | 0,9243 |
| R ² predito (R ² pred) | -0,1909 |
| <i>Adequate precision</i> | 16,9693 |

Fonte: Própria autora.

Para o ensaio com *Hylocereus polyrhizu* os valores de R² e R² ajustado foram satisfatórios, porém o R² predito obtido foi -0,19 (negativo), portanto considera-se que a média geral pode ser melhor que o próprio modelo na representação do fenômeno.

A equação 3.8 representa o modelo polinomial de terceira ordem relacionada a remoção dos compostos UV₂₅₄ em função da dosagem da *Hylocereus polyrhizus* e a salinidade.

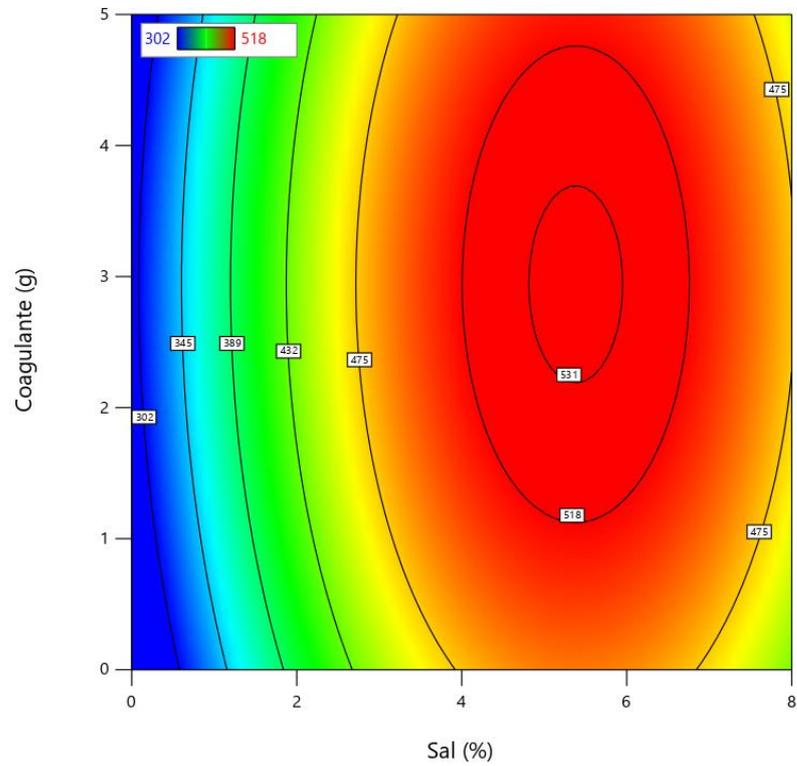
$$\text{Compostos UV}_{254} \text{ removidos} = +5,08397 + 0,364084 \cdot \text{Sal} - 0,543182 \cdot \text{Coagulante} - 0,063225 \cdot \text{Sal} \cdot \text{Coagulante} - 0,080639 \cdot \text{Sal}^2 + 0,163855 \cdot \text{Coagulante}^2 + 0,034756 \cdot \text{Sal}^2 \cdot \text{Coagulante} - 0,032964 \cdot \text{Sal} \cdot \text{Coagulante} \quad (\text{Eq. 08})$$

Ressalta-se que devido à problemas no planejamento dos experimentos, não foi possível a realização dos testes de validação para a pitaya tendo-se a UV₂₅₄ como variável resposta.

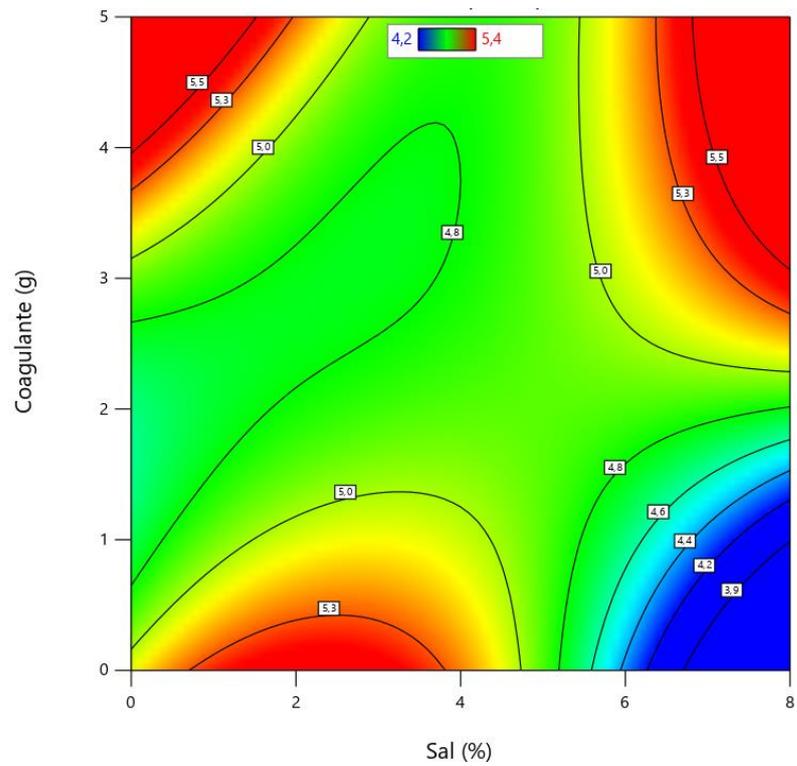
e. Otimização do processo considerando-se as duas variáveis-resposta

Na figura 3.2 são visualizados os gráficos de contorno usando o cladódio da *Hylocereus polyrhizu* na remoção da turbidez (a) e dos compostos UV₂₅₄ (b).

Figura 3.2 – Gráfico de contorno mostrando o efeitos do cladódio da *Hylocereus polyrhizus* na remoção da turbidez (a) e dos compostos UV₂₅₄ (b)



(a)



(b)

Fonte: Própria autora.

Observa-se no gráfico 3.2 (a) que as maiores eficiências na remoção da turbidez ocorreram em uma ampla faixa dentro do universo amostral. O ponto ótimo situa-se dentro do círculo limitado com os valores de 531 UNT. Contudo, este valor corresponde a uma eficiência de 63% valor muito próximo a remoção do segundo círculo, com remoção predita 518 UNT (60%). As eficiências são fortemente dependente da salinidade do meio. De Souza et al. (2014) concluíram que as maiores eficiências na remoção turbidez no tratamento de águas residuárias têxteis ocorreram ao extrair o cacto *Cereus peruvianus* em solução salina. Os autores afirmam que o processo de extração salina foi eficiente para isolar a atividade de coagulação do cacto, pois ao adicionar o sal, o mesmo permite aumentar sua solubilidade proteica, ou seja, o aumento da solvatação, uma vez que aumenta a extração de polieletrólitos naturais são responsáveis por ocasionar o processo de coagulação.

Elsayed et al. (2020) estudaram diferentes extratos de coagulantes naturais, como feijão e lentilha extraídos em cloreto de sódio e soluções de hidróxido de sódio, os autores verificaram que o aumento do sal, aumentava a atividade do agente coagulante (proteína) da solução. Sendo assim, mais agente coagulante em solução aumenta a atividade de coagulação que aumenta a eficiência da turbidez. Isto é denominado pelos autores como o fenômeno do “efeito de salga”.

Ressalta-se que conforme o gráfico, a menor remoção da turbidez foi 302 UNT, referente a 10% de remoção Nessa região não há salinidade e doses elevadas de coagulante. Gandiwa et al. (2020) em seus estudos usando uma espécie de cacto, conhecido como *Cactus opuntia* no tratamento de água bruta, observaram que uma concentração de $0,025 \text{ g L}^{-1}$ do coagulante já foi suficiente para aumentar a turbidez da água residuária. Segundo os autores isso ocorreu devido à desestabilização das partículas neutralizadas por causa do excesso de coagulante, provocando o aumento das partículas suspensas.

Em relação ao gráfico 3.2 (b) referente a remoção dos compostos UV_{254} , observa-se que existem duas regiões ótimas, correspondentes à 60% e 55%. Observa-se que a primeira região ótima é fortemente dependente da dosagem de coagulante e que a salinidade não exerce influência, portanto pode-se induzir que o cladódio da pitaya teve uma potencialidade ativa na remoção dos compostos UV_{254} , uma vez que os cladódios apresentam uma quantidade elevada de carboidratos que oferecem à cactácea uma capacidade elevada de coagulação-floculação para tratar águas residuárias (OTHANI; RASTEIRO; KHADHRAOUI, 2020). Muniz (2018)

verificou que coagulante de origem natural pode vir a aumentar os compostos orgânicos do meio, fato que contribui para doses elevadas de coagulantes não serem eficientes na remoção dos compostos UV₂₅₄.

O uso de coagulantes naturais em solução salina pode purificar as proteínas coagulantes e minimizar o retrocesso na atividade coagulante devido à presença de outros componentes (OWODUNII; ISMAIL, 2021). Portanto, esse processo pode permitir a remoção dos compostos UV₂₅₄, pois vai minimizar a carga dos compostos orgânicos presente no coagulante natural.

A outra região elevada de remoção é fortemente dependente da salinidade, o que indica que o cálcio como um sal divalente está aumentando a força iônica da solução, permitindo que os íons permaneçam na água, portanto, a coagulação é favorecida em uma faixa maior devido à compressão da camada difusa dos compostos presentes na ARC (CARVALHO et al., 2016).

Elevadas concentrações de sal resultam em ligações fortes que comprimem a dupla camada difusa (TREFALT; SZILAGYI; BORKOVEC, 2013). Este fato está relacionado à elevada força iônica associada ao efeito de blindagem na dupla camada difusa que ao ser comprimida resulta em menores forças repulsivas entre as partículas finas, facilitando a remoção dos poluentes (BEHBAHANI; RYAN; MCKENZIE, 2021).

Ressalta-se que a faixa escolhida para a remoção da turbidez situa-se entre 1,1 a 5 g L⁻¹ para dose de coagulante e 4,5 a 7% para a salinidade. Como não houve validação dos compostos UV₂₅₄ o ponto ótimo situa-se dentro do círculo limitado de 518 UNT.

3.4 Conclusões

As sementes da *Moringa Oleifera* e o cladódio da *Hylocereus polyrhizus* extraídos na solução salina de cloreto de cálcio, foram eficientes na remoção dos poluentes da água residuária do café (ARC), empregando o processo de coagulação-floculação por ar dissolvido no tratamento deste resíduo.

O uso inédito do cladódio da pitaya vermelha no tratamento da ARC mostrou-se eficiente nos testes de bancada, para a remoção da turbidez e dos compostos UV₂₅₄ deste resíduo.

Ressalta-se que o cloreto de cálcio foi fundamental na eficiência do processo, uma vez que este sal potencializa a técnica de coagulação, aumentando a capacidade

de remoção dos poluentes, uma vez que o aumento dos íons permite a redução da dupla camada difusa, facilitando a remoção das partículas da ARC.

Como faixas ótimas para o caso estudado, citam-se os valores ótimos para dose e salinidade com o uso da moringa se situam entre de 0 a 1,2 g L⁻¹ e 5 a 8% respectivamente. Já para o uso da pitaya, os valores ótimos de dose e salinidade se situam entre 1,1 a 5 g L⁻¹ e 4,5 a 7%, respectivamente.

No presente trabalho, houve a extração dos coagulantes em solução salina sem a correção do pH da ARC, ou seja, não houve adição de agentes alcalinizantes. Como a ARC é um resíduo com elevada turbidez, toxicidade e que apresenta uma grande quantidade de cargas orgânicas, sendo assim é essencial potencializar a extração dos coagulantes naturais, com intuito de melhorar a remoção dos contaminantes sem a necessidade de utilizar os coagulantes químicos. Ressalta-se que o cálcio também irá melhorar a razão de adsorção de sódio (RAS) da ARC, uma vez que esse sal é divalente.

Para a moringa, nos pontos ótimos houve uma remoção de 80% e 90% da turbidez e dos compostos UV₂₅₄, respectivamente. A pitaya proporcionou uma eficiência de remoção superior a 60% na turbidez e uma eficiência de remoção em 60% para os compostos UV₂₅₄ deste resíduo.

Em relação à estatística usada, afirma-se que o emprego do delineamento do composto central foi viável na otimização das variáveis e os modelos gerados ajustaram-se bem aos dados.

3.5 Referências

- A, A. J. et al. Treatment of coffee cherry pulping wastewater by using lectin protein isolated from *Ricinus communis* L. seed. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, n. October 2020, p. 101742, 2021.
- ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121267, 2020.
- ANGONESE, M. et al. Organic dragon fruits (*Hylocereus undatus* and *Hylocereus polyrhizus*) grown at the same edaphoclimatic conditions: Comparison of phenolic and organic acids profiles and antioxidant activities. **Lwt**, v. 149, n. March, 2021.
- ARUMUGAM, V. et al. Synthesizing green Chitosan-magnetic composite particles for palm oil mill effluent (POME) pre-treatment: A comprehensive review. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
- BAPTISTA, A. T. A. et al. Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of *moringa oleifera* for the treatment of surface water. **Chemical Engineering Journal**, v. 276, p. 166–173, 2015.
- BAPTISTA, A. T. A. et al. Protein fractionation of seeds of *Moringa oleifera* lam and its application in superficial water treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 180, p. 114–124, 2017.
- BEHBAHANI, A.; RYAN, R. J.; MCKENZIE, E. R. Impacts of salinity on the dynamics of fine particles and their associated metals during stormwater management. **Science of the Total Environment**, v. 777, p. 146135, 2021.
- BEHERA, B.; BALASUBRAMANIAN, P. Natural plant extracts as an economical and ecofriendly alternative for harvesting microalgae. **Bioresource Technology**, v. 283, n. January, p. 45–52, 2019.
- BELTRÁN-HEREDIA, J.; MARTÍN, S. J. Azo dye removal by *Moringa oleifera* seed extract coagulation. **Coloration technology**, p. 310–317, 2008.
- CAMPOS, R. C. et al. New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. **Future Foods**, v. 4, n. April, 2021.
- CARVALHO, M. S. et al. CaCl₂ applied to the extraction of *Moringa oleifera* seeds and the use for *Microcystis aeruginosa* removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 304, p. 469-475, 2016.
- CHOUDHARY, M.; RAY, M. B.; NEOGI, S. Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. **Separation and Purification Technology**, v. 209, n. July 2018, p. 714–724, 2019.

COUTO, H. J. B.; MELO, M. V.; MASSARANI, G. Treatment of milk industry effluent by dissolved air flotation. **Brazilian Journal of Engineering**, v. 21, n. 01, p. 83-91, 2004.

COSTA, A. C.; RAMOS, D. J.; SILVA, F. O. R.; DUARTE, M. H. Floração e frutificação em diferentes tipos de cladódios de pitaia-vermelha em Lavras –MG. **Rev. Bras. Frutic.** 36 (1). p.279-284, 2018.

DE BARROS, V. G. et al. Treatment of biodigested coffee processing wastewater using Fenton's oxidation and coagulation/flocculation. **Environmental Pollution**, v. 259, 2020.

DE SOUZA, M. T. F. et al. The use of a natural coagulant (*Opuntia ficus-indica*) in the removal for organic materials of textile effluents. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 8, p. 5261–5271, 2014.

DE SOUZA, M. T. F. et al. Extraction and use of *Cereus peruvianus* cactus mucilage in the treatment of textile effluents. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 67, p. 174–183, 2016.

DESTA, W. M.; BOTE, M. E. Wastewater treatment using a natural coagulant (*Moringa oleifera* seeds): optimization through response surface methodology. **Heliyon**, v. 7, n. 11, p. e08451, 2021.

DOTTO, J. et al. Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 656-665, 2019.

ELSAYED, E. M. et al. Comparison of coagulation performance using natural coagulants against traditional ones. **Separation Science and Technology (Philadelphia)**, v. 00, n. 00, p. 1–9, 2020.

FARD, M. B. et al. Utilization of *Alyssum* mucilage as a natural coagulant in oily-saline wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, p. 101763, 2020.

GANDIWA, B. I. et al. Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (*Moringa Oleifera-Cactus Opuntia*-alum blend). **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. July 2019, p. 158–164, 2020.

GEORGE, T. T. et al. *Moringa oleifera* through the years: a bibliometric analysis of scientific research (2000-2020). **South African Journal of Botany**, v. 141, p. 12–24, 2021.

IDRIS, J. et al. Dragon fruit foliage plant-based coagulant for treatment of concentrated latex effluent: Comparison of treatment with ferric sulfate. **Journal of Chemistry**, v. 2013, p. 1- 7, 2013.

JUNG, Y. et al. Evaluation of *Moringa oleifera* seed extract by extraction time: Effect on coagulation efficiency and extract characteristic. **Journal of Water and Health**, v. 16, n. 6, p. 904–913, 2018.

KUSUMA, H. S. et al. Evaluation of extract of Ipomoea batatas leaves as a green coagulant–flocculant for turbid water treatment: Parametric modelling and optimization using response surface methodology and artificial neural networks. **Environmental Technology and Innovation**, v. 24, p. 102005, 2021.

LOPES, V. D. S. et al. Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 567-572, 2020.

LO MONACO, P. A. V. et al. Effect of addition of different chemical substances in moringa seed extract used as coagulant in sewage treatment. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 5, p. 1038–1048, 2013.

LIU, S. et al. Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater. **Separation and Purification Technology**, v. 71, n. 3, p. 337-346, 2010.

MADRONA, G. S. et al. Study of the effect of Saline solution on the extraction of the *Moringa oleifera* seed's active component for water treatment. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 211, n. 1–4, p. 409–415, 2010.

MATOS, A. T. et al. Efeito da concentração de coagulantes e do pH da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 544–551, 2007.

MEGERSA, M. et al. Effect of salt solutions on coagulation performance of *Moringa stenopetala* and *Maerua subcordata* for turbid water treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 221, n. March, p. 319–324, 2019.

MOHAMED NOOR, M. H. et al. *Moringa oleifera* extract as green coagulant for POME Treatment: Preliminary studies and sludge evaluation. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1940–1947, 2020.

MONTOYA-ARROYO, A. et al. Characterization of cell wall polysaccharides of purple pitaya (*Hylocereus sp.*) pericarp. **Food Hydrocolloids**, v. 35, p. 557–564, 2014.

MUNIZ, G. L.; BORGES, A. C.; SILVA, T. C. F. DA. Performance of natural coagulants obtained from agro-industrial wastes in dairy wastewater treatment using dissolved air flotation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 37, n. April, p. 101453, 2020.

MUNIZ, G. L. **Otimização do tratamento de efluente lácteo sintético com o uso de coagulantes alternativos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

NAJIB, T. et al. Optimization of sulfate removal by sulfate reducing bacteria using response surface methodology and heavy metal removal in a sulfidogenic UASB reactor. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 4, p. 3256–3265, 2017.

OKUDA, T. et al. Improvement of extraction method of coagulation active components from *moringa oleifera* seed. **Research Note** v. 33, n. 15, p. 3373–3378, 1999.

OKUDA, T. et al. Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v. 35, n. 3, p. 830–834, 2001.

OLADOJA, N. A. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. **Journal of Water Process Engineering**, v. 6, p. 174–192, 2015.

OTHMANI, B.; RASTEIRO, M. G.; KHADHRAOUI, M. Toward green technology: a review on some efficient model plant-based coagulants/flocculants for freshwater and wastewater remediation. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 22, n. 5, p. 1025–1040, 2020.

OWODUNNI, A. A.; ISMAIL, S. Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment—A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 42, n. 2, p. 102096, 2021.

PAL, S. et al. Flocculation properties of polyacrylamide grafted carboxymethyl guar gum (CMG-g-PAM) synthesised by conventional and microwave assisted method. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 3, p. 1580–1588, 2011.

PEREIRA, M. S. **Flotação por ar e ozônio dissolvidos no tratamento de efluentes de indústrias lácteas**. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2017.

PIN, B. V. DA R. et al. Energetic use of biogas from the anaerobic digestion of coffee wastewater in southern Minas Gerais, Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2084–2094, 2020.

PIRES, J. F. et al. Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 278, n. P2, p. 111541, 2021.

PRABHAKARAN, G.; MANIKANDAN, M.; BOOPATHI, M. Treatment of textile effluents by using natural coagulants. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

SABETI, Z.; ALIMOHAMMADI, M.; YOUSEFZADEH, S.; ASLANI, H.; GHANI, M.; NABIZADEH, R. Application of response surface methodology for modeling and 108 optimization of *Bacillus subtilis* spores inactivation by the UV/persulfate process. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 17, n. 2, p. 342-351, 2016.

SAID, N. S. M. et al. Phytoremediation of real coffee industry effluent through a continuous two-stage constructed wetland system. **Environmental Technology and Innovation**, v. 17, p. 100502, 2020.

SAID, N. S. M. et al. Endurance of *Phragmites karka* in removing colour and suspended solids from industrial coffee processing effluents in a continuous reed bed system. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, n. September 2020, p. 101832, 2021.

TEIXEIRA, V. et al. Moringa seed extract with a potential similar flocculant activity to a synthetic polymer during sugarcane clarification. **Biomass Conversion and Biorefinery**, n. 0123456789, 2021.

TREFALT, G.; SZILAGYI, I.; BORKOVEC, M. Poisson-Boltzmann description of interaction forces and aggregation rates involving charged colloidal particles in asymmetric electrolytes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 406, p. 111–120, 2013.

TRIQUES, C. C. et al. Influence evaluation of the functionalization of magnetic nanoparticles with a natural extract coagulant in the primary treatment of a dairy cleaning-in-place wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, 2020.

UEDA YAMAGUCHI, N. et al. A review of *Moringa oleifera* seeds in water treatment: Trends and future challenges. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 147, p. 405–420, 2021.

WEN, Y.; SCHOUPS, G.; VAN DE GIESEN, N. Organic pollution of rivers: Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. **Scientific Reports**, v. 7, n. February, p. 1–9, 2017.

ZHANG, Y. et al. Optimization of enzymatic hydrolysis for effective lipid extraction from microalgae *Scenedesmus* sp. **Renewable Energy**, v. 125, p. 1049–1057, 2018.