



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**MARISA MELO COSTA**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS**  
**COM METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA:**  
**ESTUDO DE COAGULANTES INORGÂNICOS PARA REMOÇÃO DE COR,**  
**TURBIDEZ E UV 254**

Palmas / TO  
2023

**Marisa Melo Costa**

**Otimização do processo de coagulação de águas superficiais com metodologia  
de superfície de resposta:  
estudo de coagulantes inorgânicos para remoção de cor, turbidez e UV 254**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre (a) em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva

**Palmas / TO  
2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- C837o Costa, Marisa Melo Costa.  
Otimização do processo de coagulação de águas superficiais com metodologia de superfície de resposta: estudo de coagulantes inorgânicos para remoção de cor, turbidez e UV 254. / Marisa Melo Costa Costa. – Palmas, TO, 2023.  
65 f.  
Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2023.  
Orientador: Giulliano Guimarães Silva Silva  
1. Tratamento de água,. 2. Metodologia de Superfície de Resposta.  
3. Coagulação. 4. Planejamento Experimental. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

**MARISA MELO COSTA**

**Otimização do processo de coagulação de águas superficiais com metodologia  
de superfície de resposta:  
estudo de coagulantes inorgânicos para remoção de cor, turbidez e UV 254**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, foi avaliada para obtenção do título de Mestre (a) em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 30 de outubro de 2023

Banca Examinadora

Prof. DSc. Giulliano Guimarães Silva, IFTO

Prof. DSc. Sérgio Carlos Bernardo Queiroz, UFT

Profa. DSc. Alice Rocha de Souza, IFTO

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que me deu o livre arbítrio permitindo que eu escolhesse os caminhos que acreditei que me trariam até a conclusão desta jornada.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Tocantins (UFT), especialmente, ao Prof. Giulliano Guimarães que orientou de forma muito tranquila a realização deste trabalho.

Ao Prof. Sérgio Queiroz e à querida Dr<sup>a</sup> Angela Di Bernardo Dantas que muito contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

A toda minha família por sempre acreditar na minha capacidade e por toda dedicação durante toda a minha vida.

Aos colegas de trabalho, Rafael, por sua colaboração determinante para o sucesso dos experimentos realizados nesse estudo, e Andreney, meu parceiro nessa jornada acadêmica...alcançamos a linha de chegada!

Por fim, um agradecimento especial a minha filha Bárbara por todo incentivo e torcida.

*“Não dê ouvidos a ninguém que lhe diga que você não pode alcançar algo. Sonhe o impossível! Você tem que trabalhar por isso, persegui-lo e nunca desistir!”*

Lewis Hamilton

## RESUMO

O desempenho de coagulantes inorgânicos foi estudado para otimizar a coagulação de águas superficiais. A degradação da qualidade da água dos mananciais e as necessidades de atendimento a um padrão de potabilidade cada vez mais exigente são desafios a serem superados pelas companhias de saneamento. Otimizar a coagulação traz diversos benefícios ao processo de tratamento de água, desde a redução de custo até a produção de água segura. O método clássico utilizado para otimização envolve a alteração de uma variável do processo por vez, sendo demorado e dispendioso. A metodologia de superfície de resposta (MSR) permite que os experimentos sejam realizados em uma ampla variedade de condições, enquanto reduz o número total de ensaios necessários, construindo modelos com precisão, possibilitando respostas ágeis e assertivas para tomadas de decisões, economizando recursos humanos e materiais e aumentando a eficiência operacional. Neste trabalho o processo de coagulação de águas superficiais foi otimizado com a MSR para remoção simultânea de cor, turbidez e UV 254 e determinação do pH de coagulação, avaliando o desempenho de três coagulantes inorgânicos. Um planejamento composto central rotacional foi empregado para descrever a dependência das variáveis dosagem de coagulante e de alcalinizante na remoção de cor, turbidez e UV254. Os dados obtidos foram analisados pelo software protimiza, que também determinou modelos quadráticos, verificados por análise de variância, e gerou gráficos de superfície de resposta. Os modelos obtiveram precisão acima de 90%, demonstrando o ajuste destes ao processo de coagulação, e foram validados por ensaios em triplicata. A função Desirability estabeleceu as dosagens ótimas para a otimização simultânea. Verificou-se que o PAC ferroso alcançou as maiores remoções com menores dosagens, em comparação com sulfato de alumínio e sulfato férrico. As dosagens de coagulante e de alcalinizantes otimizadas em mg/L foram, respectivamente, de 78 e 0,5 para o PAC; 105 e 68 para sulfato férrico e 105 e 29 para o sulfato de alumínio, correspondentes a residuais de, aproximadamente 19; 1 e 0,1 para cor (mg/L Pt-Co), turbidez (uT) e UV254 (m<sup>-1</sup>), respectivamente. A MSR foi validada como uma ferramenta útil em ETAs, oferecendo respostas ágeis com economia de recursos.

Palavras chave: coagulação, MSR, DCCR, otimização simultânea, tratamento de água, função Desirability.

## ABSTRACT

The performance of inorganic coagulants has been studied to optimize the coagulation of surface waters. The degradation of water quality in sources intended for public supply and the need to meet an increasingly demanding potability standard are challenges to be overcome by sanitation companies in the context of water treatment. Optimizing coagulation brings several benefits to the treatment process, from cost reduction to the production of safe water. The classic method used for optimization involves changing one process variable at a time, which is time-consuming and expensive. The response surface methodology (MSR) allows experiments to be carried out in a wide variety of conditions, while reducing the total number of tests required, building models with precision, enabling agile and assertive responses for decision making, saving human resources and materials and increasing operational efficiency. In this work, the surface water coagulation process was optimized with MSR for simultaneous removal of color, turbidity and UV 254 and determination of coagulation pH, evaluating the performance of three inorganic coagulants. A central rotational composite design was used to describe the dependence of the coagulant and alkalizer dosage variables on the removal of color, turbidity and UV254. The data obtained was analyzed by the protimiza software, which also determined quadratic models, verified by analysis of variance, and generated response surface graphs. The models achieved accuracy above 90%, demonstrating their adjustment to the coagulation process and were validated by triplicate tests. The Desirability function established the optimal dosages for simultaneous optimization. It was found that ferrous PAC achieved the highest removals with lower dosages, compared to aluminum sulfate and ferric sulfate. The optimized dosages of coagulant and alkalizers in mg/L were, respectively, 78 and 0.5 for PAC; 105 and 68 for ferric sulfate and 105 and 29 for aluminum sulfate, corresponding to residuals of approximately 19; 1 and 0.1 for color (mg/L Pt-Co), turbidity (uT) and UV254 (m-1), respectively. MSR has been validated as a useful tool in ETAs, offering agile responses with resource savings.

Keywords: coagulation, MSR, DCCR, simultaneous optimization, water treatment, Desirability function

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais Tecnologias de Tratamento de Água para Consumo Humano. .....	20
Figura 2 – Tamanho das Partículas Presentes na Água e Técnicas de Remoção	21
Figura 3 – Representação da Dupla Camada Elétrica .....	24
Figura 4 - Esquema de reações de coagulação por adsorção e neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio como coagulante.....	27
Figura 5 – Mecanismos de Coagulação Associados ao Diagrama de Solubilidade do Sulfato de Alumínio. ....	30
Figura 6 – Fluxograma das etapas do estudo.....	34
Figura 7 – Acondicionamento da água bruta ensaiada .....	37
Figura 8 – Variáveis de entrada e de resposta adotadas para o planejamento experimental.....	37
Figura 9 - Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados: PAC Ferroso.....	47
Figura 10 – Gráficos de superfície de resposta para o PAC Ferroso .....	48
Figura 11 – Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados, Sulfato Férrico ..	50
Figura 12 – Gráficos de superfície de resposta para o sulfato férrico. ....	51
Figura 13 – Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados, Sulfato de Alumínio .....	53
Figura 14 – Gráficos de superfície de resposta para o sulfato de alumínio.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de programação dos ensaios em Jarrest. ....	35
Tabela 2 – Parâmetros adotados no preparo das soluções de coagulantes e alcalinizante.....	36
Tabela 3 – Planejamento DCCR .....	38
Tabela 4 – Parâmetros de programação dos ensaios em jartes. ....	44
Tabela 5 – Caracterização da água bruta .....	45
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tratabilidade com PAC Ferroso .....	46
Tabela 7 - Dados da regressão para as variáveis respostas: PAC Ferroso .....	46
Tabela 8 – Modelos ajustados: PAC Ferroso .....	47
Tabela 9 – Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de resposta: PAC Ferroso .....	48
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tratabilidade com Sulfato Férrico .....	49
Tabela 11- Dados brutos da regressão para as variáveis de resposta, Sulfato Férrico. ....	49
Tabela 12 – Modelos Ajustados .....	50
Tabela 13 – Análise de Variância (ANOVA) para os parâmetros de resposta, sulfato férrico .....	51
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de tratabilidade com Sulfato de Alumínio... ..	52
Tabela 15 - Dados brutos da regressão para as variáveis respostas, Sulfato de Alumínio .....	52
Tabela 16 – Modelos ajustados, Sulfato de Alumínio .....	53
Tabela 17 – Análise de Variância (ANOVA) para os parâmetros de resposta.....	54
Tabela 18 – Valores preditos e obtidos e condições ótimas de cada coagulante .....	55
Tabela 19 – Dados de otimização simultânea dos modelos.....	56

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Características dos mecanismos de desestabilização de partículas com coagulantes metálicos .....	27
Quadro 02 – Equipamentos utilizados para os ensaios de tratabilidade e análises de água .....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
COT	Carbono Orgânico Total
ETA	Estação de Tratamento de Água
D	Desejabilidade combinada
DCCR	Design Composto Central Rotacional
DCE	Dupla Camada Elétrica
$d_i$	Desejabilidade individual
DLVO	Teoria Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek
DOE	Planejamento de Experimentos (Desing of Experiments)
g	Gramas
GM	Gabinete do Ministro
H <sub>2</sub> O	Fórmula química da água
H <sup>+</sup>	Íons Hidrogênio
L	Litro
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$\text{m}^{-1}$	Metros elevado a -1.
mg/L	Miligramas por Litro
mL	Mililitros
MON	Matéria Orgânica Natural
MS	Ministério da Saúde
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
m/v	Massa por volume
NBR	Norma Brasileira
nm	Nanômetros
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAC	Cloreto de Poli Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PM	Peso Molecular

PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
Pt-Co	Platina - Cobalto
Rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
SPD	Subprodutos da Desinfecção
<i>spp</i>	Espécie
uT	Unidades de Turbidez
UV	Ultra Violeta
UV254	absorvância ultravioleta a 254 nm
VMP	Valor Máximo Permitido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	18
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	19
<b>3.1</b>	<b>Mananciais superficiais</b>	19
<b>3.2</b>	<b>Tecnologias de tratamento de água</b>	20
<b>3.3</b>	<b>Matéria orgânica natural e subprodutos da desinfecção</b>	21
<b>3.4</b>	<b>Coagulação</b>	22
<b>3.5</b>	<b>Estabilidade da Partícula (Dupla Camada Elétrica)</b>	23
3.5.1	Potencial Zeta	24
<b>3.6</b>	<b>Mecanismos de Coagulação</b>	24
3.6.1	Compressão da Dupla Camada Elétrica	25
3.6.2	Adsorção	25
3.6.3	Formação de Pontes	25
3.6.4	Varredura	26
<b>3.7</b>	<b>Coagulantes</b>	28
3.7.1	Sulfato de Alumínio	28
3.7.2	Sulfato Férrico	29
3.7.3	Cloreto de Polialumínio Ferroso	29
<b>3.8</b>	<b>Diagramas de Coagulação</b>	30
<b>3.9</b>	<b>Planejamento de Experimentos</b>	31
<b>3.10</b>	<b>Função Desirability</b>	33
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	34
<b>4.1</b>	<b>Equipamentos</b>	35
<b>4.2</b>	<b>Produtos Químicos</b>	36
<b>4.3</b>	<b>Coleta, armazenamento e caracterização da água bruta</b>	36
4.3.1	Coleta e armazenamento	36
4.3.2	Caracterização	37
<b>4.4</b>	<b>Planejamento Experimental por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)</b>	37
<b>4.5</b>	<b>Ensaio no equipamento estático</b>	38
<b>4.6</b>	<b>Modelos matemáticos e otimização</b>	38
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	39
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	57
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	58

## 1 INTRODUÇÃO

A Lei 14.026/2020, conhecida como novo marco legal do saneamento, gerou pressões e desafios para o setor, uma vez que tem como principal objetivo a ser alcançado a universalização dos serviços de saneamento básico.

O acesso à água potável é também um componente chave para cumprir as metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) estipuladas pela Agenda 2030 das Nações Unidas (CHIAVOLA *et al.*, 2023 e ONU, 2015).

Com as metas ambiciosas de garantir que 99% da população brasileira tenha acesso a água potável e 90% ao tratamento e coleta de esgoto até 2033, as companhias de saneamento intensificaram a busca por recursos a fim de garantir novos investimentos na infraestrutura dos serviços.

Ao mesmo tempo, a abertura do mercado para a iniciativa privada, também promovida pela referida legislação, implementou a concorrência no setor de saneamento, levando à necessidade de melhoria da qualidade dos serviços prestados e a busca por maior eficiência em suas operações.

No âmbito do tratamento de água, a estes dois últimos desafios, somam-se o aumento do consumo de água, seja por alterações climáticas ou pelo aumento da população (HASHIM *et al.*, 2017; ZUBAIDE *et al.*, 2019), a degradação da qualidade da água dos mananciais destinados ao abastecimento público e as necessidades de atendimento a um padrão de potabilidade cada vez mais exigente e de implementação de medidas para produção de água segura (LIN *et al.*, 2023).

Pesquisa realizada em 20 estações de tratamento de água em operação concluiu que o pré tratamento químico antes da filtração – coagulação - é mais crítico para o sucesso do que as instalações físicas da planta (CLEASBY *et al.* 1989).

A necessidade de uma compreensão profunda do processo de coagulação justifica-se no fato de que muitas águas usadas para abastecimento público possuem diversos contaminantes e os requisitos para remoção de particulados e orgânicos tornam-se cada vez mais rigorosos.

Otimizar o processo de coagulação traz diversos benefícios ao processo de tratamento, desde a redução de custo até a produção de água segura.

A qualidade dos recursos hídricos continentais, além de depender de suas características naturais, está diretamente relacionada com os usos múltiplos da água e o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica. As principais fontes não antropogênicas são os processos hidrogeológicos, as mudanças climáticas e desastres naturais. As influências antropogênicas incluem despejos de efluentes domésticos e industriais, deflúvio superficial urbano e agrícola e a pecuária (KOUL *et al.*, 2022).

Os poluentes químicos, físicos ou biológicos lançados na água podem ser depositados no leito d'água ou permanecerem suspensos na água, causando turbidez, que está entre as características mais comuns de água poluída (ALENAZI *et al.*, 2020; ABDULLA *et al.*, 2020).

Na última década a portaria que regula o padrão de potabilidade da água passou por quatro revisões, sendo, ao longo destas, alterado o critério para aceitação do parâmetro turbidez pós-filtração, que se tornou mais exigente (BRASIL, 2004; BRASIL, 2011; BRASIL, 2017 E BRASIL, 2021).

A crescente preocupação com esse parâmetro deve-se ao fato dessas partículas poderem ser um veículo de substâncias tóxicas e microorganismos, além de causar problemas estéticos (USEFI, e ASADI-GHALHARI, 2019; CHIAVOLA *et al.*, 2023).

O processo das estações de tratamento de água (ETAs) deve promover a eliminação ou redução das concentrações de elementos químicos e microorganismos a níveis não prejudiciais à saúde humana (DI BERNARDO *et al.*, 2017). A remoção dessas partículas deve ocorrer na etapa de coagulação/floculação seguida de decantação e filtração. (FERREIRA FILHO, 2017).

A coagulação é um processo pelo qual promove-se a desestabilização das partículas presentes na água, possibilitando sua remoção nas etapas subsequentes do tratamento (ALENAZI *et al.*, 2020; LIBÂNIO, 2016). É considerado o processo mais acessível e adequado para fornecer água potável em países em desenvolvimento devido ao seu baixo custo e fácil operação (ZHOU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019; HASHIM, 2019).

Os sais férricos e de alumínio e os polímeros são os coagulantes mais utilizados devido ao seu baixo custo e eficácia (BRATBY, 2016; KURNIAWAN *et al.*, 2020; ROSINSKA e DABROWSKA, 2021)

A variedade de coagulantes comerciais e as diferentes características de água bruta, dificultam a escolha do produto adequado para águas superficiais específicas (JASSIM *et al.*, 2020). Como a dosagem dos coagulantes utilizados está amplamente relacionada aos padrões de qualidade da água distribuída, bem como aos custos de tratamento, sua estratégia de seleção é de grande importância prática para o gerenciamento de estações de tratamento de água (ETA). (LI *et al.*, 2022; KURNIAWAN *et al.*, 2020).

Além da turbidez, outros parâmetros como cor aparente e absorvância ultravioleta a 254 nm (UV 254) podem ser usados para avaliar o desempenho da coagulação (SUQUET, *et al.*, 2021).

O método clássico utilizado em otimizações de processos envolve a alteração de uma variável por vez, sendo demorado e dispendioso. Além disso, não identifica intrinsecamente o comportamento das interações entre as variáveis envolvidas.

Nesse sentido, a metodologia de superfície de resposta (MSR) permite que os experimentos sejam realizados em uma ampla variedade de condições, enquanto reduz o número total de ensaios necessários, construindo modelos com precisão comparados à função de resposta verdadeira em uma área próxima ao ótimo, usando fatores independentes como parâmetros do processo. (RODRIGUES & IEMMA, 2014).

Nesse trabalho, o efeito de variáveis independentes, dosagem de coagulante e de alcalinizante, e as interações dessas variáveis na remoção de turbidez, cor e UV 254 de águas superficiais foi estudado e otimizado de forma multiobjetiva, aplicando planejamento de experimentos utilizando metodologia de superfície de resposta.

Apesar de poder ser uma ferramenta útil na operação de ETAs, o uso da MSR ainda é insipiente no âmbito do tratamento de água. Desta forma, esse trabalho demonstra como sua aplicação possibilita respostas ágeis e assertivas para tomadas de decisões, visando a otimização do processo, economizando recursos humanos e materiais e aumentando a eficiência operacional.

## 2 OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo otimizar o processo de coagulação de águas superficiais com a metodologia de superfície de resposta para remoção simultânea de cor, turbidez e UV 254 e determinar o pH de coagulação, avaliando o desempenho de três coagulantes inorgânicos.

Dessa forma, pretende-se especificamente:

- Estudar os efeitos das interações entre a dosagem de coagulante e de alcalinizante na remoção de cor, turbidez e UV 254;
- Estabelecer modelos matemáticos preditivos do processo de coagulação para cada coagulante e variável de resposta;
- Determinar as dosagens de coagulante e alcalinizante que otimizam simultaneamente a coagulação da água de estudo para os parâmetros cor, turbidez, UV254 e pH de coagulação;
- Determinar o coagulante mais eficaz no processo de coagulação da água de estudo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Mananciais superficiais

De acordo com os dados da última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 2017, os mananciais superficiais são a principal fonte de captação de água doce para abastecimento público no Brasil, especialmente nos municípios com mais de 500 000 habitantes, com volumes três vezes maior do que o volume captado em poços profundos (IBGE, 2017).

As águas superficiais naturais contêm partículas orgânicas e inorgânicas. Estas últimas, proveniente do intemperismo natural de minerais, consistem em óxidos de ferro, como goetita, hematita e hidróxido de ferro; dióxido de sílica; calcitas; argilas como caulinita, montmorilonita, moscovita ou bentonita; óxidos de alumínio puros e mistos; e muitos outros minerais. Partículas orgânicas podem incluir vírus, bactérias, algas, cistos e oocistos de protozoários. Além disso, as águas superficiais possuem, ainda, constituintes orgânicos dissolvidos, como ácidos húmicos. Estes juntamente às partículas orgânicas são denominados de matéria orgânica natural (MON). Sozinhas, as partículas inorgânicas são censuráveis na água porque afetam suas qualidades estéticas. No entanto, na forma de pequenos colóides, mesmo em pequenas concentrações, essas partículas podem apresentar áreas de superfície substanciais para a adsorção de MON, pesticidas e outros compostos orgânicos sintéticos, metais e outras substâncias tóxicas. (BRATBY, 2016)

Howe (2016) ressalta a importância da remoção de partículas da água, justificando que a presença destas pode (1) elevar a turbidez a níveis inaceitáveis, bem como conferir cor à água (razões estéticas), (2) ser um agente infecciosos, quando da presença de vírus, bactérias e protozoários, e (3) adsorver compostos tóxicos em sua superfície, prejudicando a eficiência da desinfecção. Cita ainda que a remoção de MON dissolvida é importante porque muitos dos seus constituintes são precursores da formação de subprodutos de desinfecção, quando o cloro é usado, e sua presença também pode conferir cor à água.

Na PNSB realizada em 2017 também informou a existência de poluição e/ou contaminação em pontos de captação de água para abastecimento público, sendo o esgoto sanitário, a destinação inadequada do lixo, e os resíduos agrotóxicos as formas de poluição e/ou contaminação identificadas e mais citadas (IBGE, 2017).

### 3.2 Tecnologias de tratamento de água

A fim de atender aos padrões de qualidade estabelecidos pela portaria de potabilidade do Ministério da Saúde, toda água destinada ao consumo humano deve passar por processo de tratamento adequado à sua qualidade.

Di Bernardo *et al.* (2017) resume as tecnologias de tratamento de em dois grupos: sem coagulação e com coagulação. Na Figura 01 são apresentadas as principais alternativas de tratamento com e sem coagulação.

Para Howe (2016), as tecnologias que empregam coagulação são as mais comumente utilizadas para remover o material particulado e parte da MON dissolvida das águas superficiais.

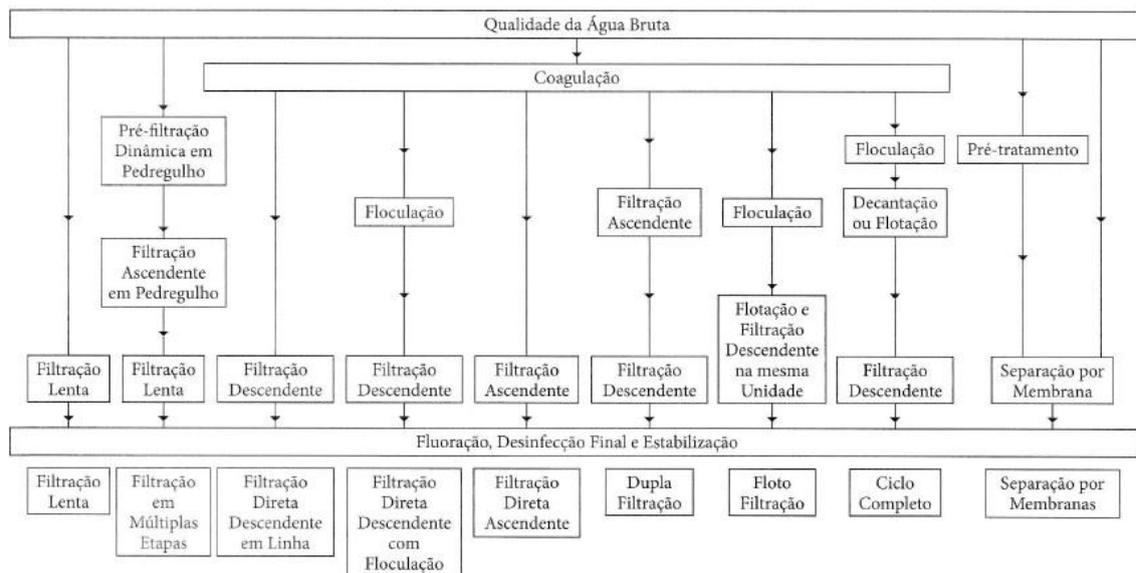


Figura 1 – Principais Tecnologias de Tratamento de Água para Consumo Humano.

Fonte: Di Bernardo *et al.*, 2017

No Brasil, os tratamentos que empregam a coagulação correspondem a 64,2%. Considerando apenas os municípios mais populosos, esse valor chega a mais de 90% (IBGE, 2017).

De acordo com Ferreira Filho (2017), Águas naturais tem origem diversa e diferentes características físico-químicas que influenciarão o processo de tratamento. Este autor destaca a importância do entendimento sobre o tamanho das partículas presentes na água, apresentando a classificação das partículas por tamanho, conforme a seguir:

- partículas em suspensão possuem dimensões superiores a 1 µm

- partículas dissolvidas possuem dimensões inferiores a  $10^{-3} \mu\text{m}$
- partículas coloidais possuem dimensões entre os diâmetros,  $10^{-3} \mu\text{m}$  e  $1 \mu\text{m}$

Pequenas partículas suspensas e coloidais e constituintes dissolvidos possuem estabilidade e, assim, depositam em um período de tempo razoável. Para remover esses materiais da água, é necessário (a) alterar as propriedades da superfície do material particulado, aumentando assim a adsorção das partículas a um determinado meio filtrante, ou gerar uma tendência de agregação de partículas menores em unidades maiores; (b) precipitar o material dissolvido, criando, assim, material particulado para o qual a separação por sedimentação e/ou filtração é viável. Tal conversão do estado estável de uma dada dispersão ou solução para um estado instável é chamado de desestabilização, que ocorre por meio dos processos de coagulação e floculação (BRATBY, 2016).

A Figura 02 apresenta um esquema elaborado por Di Bernardo *et al.* (2017) classificando as partículas em meio aquoso por tamanho e associando às técnicas para remoção.

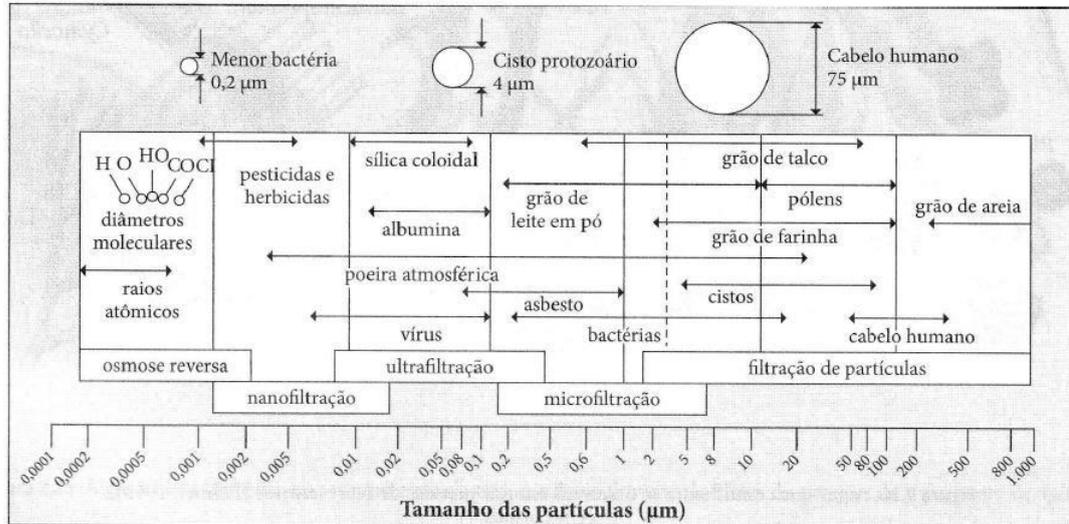


Figura 2 – Tamanho das Partículas Presentes na Água e Técnicas de Remoção

Fonte: Di Bernardo *et al.* (2017)

### 3.3 Matéria orgânica natural e subprodutos da desinfecção

A Matéria Orgânica Natural (MON) é uma matriz heterogênea formada por compostos orgânicos particulados, coloidais e dissolvidos (Suquet *et al.*, 2021).

As substâncias húmicas, formadas pela degradação química e biológica de resíduos de vegetais e animais, e de atividades de síntese de microrganismos, constituem a maior parte da MON presente no solo, em sedimentos e na água (DI BERNARDO *et al.*, 2017). Estas estão diretamente relacionadas com a formação de subprodutos orgânicos halogenados quando compostos clorados, utilizados como oxidantes e/ou desinfetantes, são aplicados no tratamento da água (CHAUKURA *et al.*, 2020; GODO-PLA *et al.*, 2020; GODO-PLA *et al.*, 2019)

Os subprodutos da desinfecção (SPD) são relatados como compostos nocivos para os seres humanos e, como tal, são regulamentados tanto em diretivas europeias (UE, 2020) como nacionais (BRASIL, 2021).

Uma alternativa para minimizar a formação de SPD é a remoção dos precursores de sua formação, notadamente as moléculas orgânicas que compõem a MON.

A coagulação é o principal tratamento de remoção de matéria orgânica para ETAs que produzem água potável a partir de fontes superficiais (ANDERSON *et al.*, 2020; WILLIAMS *et al.*, 2019). Os coagulantes de sais de alumínio ou de ferro podem agregar as substâncias húmicas, que posteriormente podem ser removidas por adsorção no precipitado (SUQUET *et al.*, 2021).

No que concerne ao monitoramento da MON, a absorção da radiação ultravioleta no comprimento de onda 254 nm (UV254) pode ser empregada como um parâmetro representativo dos precursores de SPD (WESTPHALEN *et al.*, 2016)

### **3.4 Coagulação**

De acordo com Libânio (2016), a coagulação consiste essencialmente na desestabilização das partículas coloidais e suspensas realizada pela conjugação de ações físicas e reações químicas, com duração de poucos segundos, entre o coagulante - usualmente um sal de alumínio ou de ferro -, a água e as impurezas presentes. Este autor destaca a importância deste processo relacionando a remoção de partículas a segurança da água, pela associação destas a organismos patogênicos.

Howe (2016) explica que a coagulação envolve a adição de um coagulante ou coagulantes químicos com a finalidade de condicionar a matéria suspensa, coloidal e

dissolvida para processamento subsequente por floculação ou para criar condições que permitirão a remoção posteriormente do material particulado e dissolvido.

A coagulação é o resultado de dois fenômenos, um químico e o outro físico. O primeiro, dependente da concentração do metal e do pH final da mistura, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva. O segundo configura-se pelo transporte das espécies hidrolisada para que haja contato com as impurezas presentes na água, promovido pela etapa de mistura rápida nas estações de tratamento de água (ETA), causando sua desestabilização ou envolvimento nos precipitados. (DI BERNARDO *et al*, 2017)

Evidencia-se, assim, a importância do conhecimento da interação do coagulante com as impurezas presentes na água, a fim de garantir a eficiência dos processos de coagulação empregados no tratamento de águas de abastecimento, destacando-se os fatores escolha do coagulante, sua dosagem e definição do pH de coagulação.

### **3.5 Estabilidade da Partícula (Dupla Camada Elétrica)**

A estabilidade das partículas em águas naturais depende do equilíbrio entre a força eletrostática repulsiva e as forças atrativas (forças de van der Waals). Como as partículas na água tem uma carga superficial negativa, o principal mecanismo que controla sua estabilidade é a repulsão eletrostática (HOWE, 2016).

Bratby (2016) explica que as forças que promovem a estabilidade de uma dispersão coloidal surgem da: (1) presença de uma carga superficial na interface entre o coloide e o líquido; e (2) hidratação das camadas superficiais do coloide.

A Figura 03 ilustra o processo descrito acima, por meio do modelo proposto por Stern, onde, primeiramente, uma camada de íons de carga oposta ao redor da partícula se ligará firmemente à sua superfície para formar uma camada compacta fixa com cerca de 0,5 nm de espessura, conhecida como camada Stern. Para além desta, está presente um campo elétrico que atrai um excesso de cátions e repele ânions que se movem sob a influência da difusão causada pelas colisões com as moléculas do solvente. A concentração excedente de cátions, denominada de camada difusa, se estende para a solução até que toda carga superficial e potencial elétrico são eliminados e a neutralidade é satisfeita. Juntas, as camadas, compacta e difusa, são

conhecidas como a dupla camada elétrica (DCE), podendo estender-se até 30 nm da solução (HOWE, 2016).

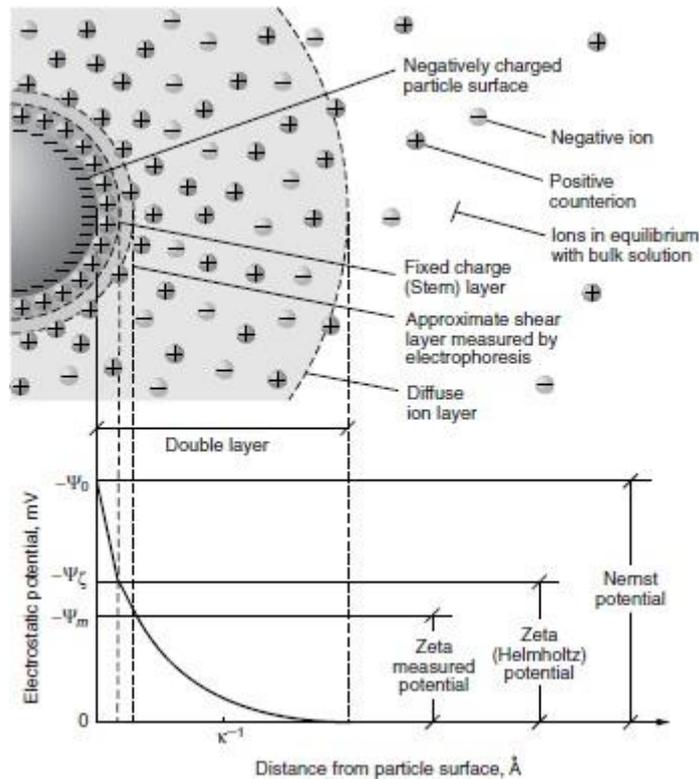


Figura 3 – Representação da Dupla Camada Elétrica

Fonte: Howe, 2016

### 3.5.1 Potencial Zeta

O potencial Zeta é uma medida da estabilidade de uma partícula, podendo ser utilizado como um parâmetro de controle do processo de coagulação. Representa a energia eletrostática necessária para desestabilizá-la, ou seja, o potencial a ser aplicado, capaz de deslocar um íon de mesmo sinal do ponto mais remoto da camada difusa à superfície da camada compacta (LIBÂNIO, 2016).

### 3.6 Mecanismos de Coagulação

Para desestabilizar partículas coloidais em suspensão, faz-se necessário alterar a força iônica do meio, promovendo a coagulação. Di Bernardo *et al.* (2017) explica que atualmente considera-se a coagulação como resultado individual ou combinado da ação de quatro mecanismos distintos: (a) compressão da dupla camada elétrica; (b) adsorção e neutralização; (c) varredura; (d) adsorção e formação de pontes, que podem inclusive ocorrer simultaneamente.

### 3.6.1 Compressão da Dupla Camada Elétrica

Este mecanismo de coagulação consiste no aumento da força iônica do meio, ocasionando a compressão da camada difusa. Libânio (2016) explica o fenômeno utilizando o modelo desenvolvido por Schulze-Hardy em 1900, conhecido como DLVO, onde os íons de carga positiva atravessam a camada compacta, reduzindo a magnitude do potencial zeta e a espessura da dupla camada, permitindo a posterior aproximação das partículas.

Bratby (2016) destaca dois aspectos neste mecanismo: (a) a transição da estabilidade para a desestabilização ocorre em uma faixa estreita de concentração de eletrólitos; (b) a concentração necessária de um eletrólito (ou coagulante) para promover a desestabilização é independente da concentração de partículas e (c) dosagens superiores às preconizadas pela lei de Schulze-Hardy não promovem a reestabilização das partículas.

### 3.6.2 Adsorção

As partículas podem ser desestabilizadas pela adsorção de íons ou polímeros de carga oposta. A maioria das partículas em águas naturais são carregadas negativamente (argilas, ácidos húmicos, bactérias) na faixa de pH neutro (pH 6 a 8); conseqüentemente, sais metálicos hidrolisados carregados positivamente, sais metálicos pré-hidrolisados e polímeros orgânicos catiônicos podem ser usados para desestabilizar partículas através da neutralização da carga na superfície da partícula. Se a superfície da partícula não tiver carga líquida, a DCE não existirá e as forças de van der Waals podem fazer com que as partículas se unam (HOWE, 2016).

Ferreira Filho (2017) observa a dependência da relação estequiométrica entre a concentração de partículas coloidais e a dosagem de coagulante neste mecanismo. Assim, quanto maior for a quantidade de partículas coloidais na fase líquida maior será a dosagem de coagulante requerido para sua desestabilização.

### 3.6.3 Formação de Pontes

O mecanismo de formação de ponte caracteriza-se por envolver polímeros que servem de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas, promovendo assim a desestabilização destas últimas. São empregados polímeros não iônicos e polímeros de alto peso molecular (PM 105 a 107 g/mol) e baixa carga

superficial. Polímeros catiônicos de alto peso molecular têm uma alta densidade de carga para neutralizar a carga da superfície. A ponte de polímero é um fenômeno de adsorção; conseqüentemente, a dose ótima de coagulante será geralmente proporcional à concentração de partículas presentes. (DI BERNARDO *et al.*, 2017; HOWE, 2016)

#### 3.6.4 Varredura

Este mecanismo de desestabilização é promovido pelo uso de coagulantes metálicos, especificamente pela ação do precipitado de hidróxido metálico formado sob condições apropriadas de concentração e pH. Tais espécies servem para enredar o material particulado, efetuando assim a desestabilização essencialmente por uma ação de varredura. Neste mecanismo os efeitos eletrostáticos são relativamente sem importância. Reações de coordenação ocorrem entre íons metálicos e certos grupos funcionais na superfície da partícula que servem como ligantes. A desestabilização é visualizada como resultado do íon metálico – grupo funcional – formação de precipitado de hidróxido (BRATBY, 2016).

A Figura 04 mostra as possíveis reações que podem ocorrer através dos mecanismos de coagulação por adsorção e neutralização de cargas e por varredura, quando utilizado sulfato de alumínio como agente coagulante.

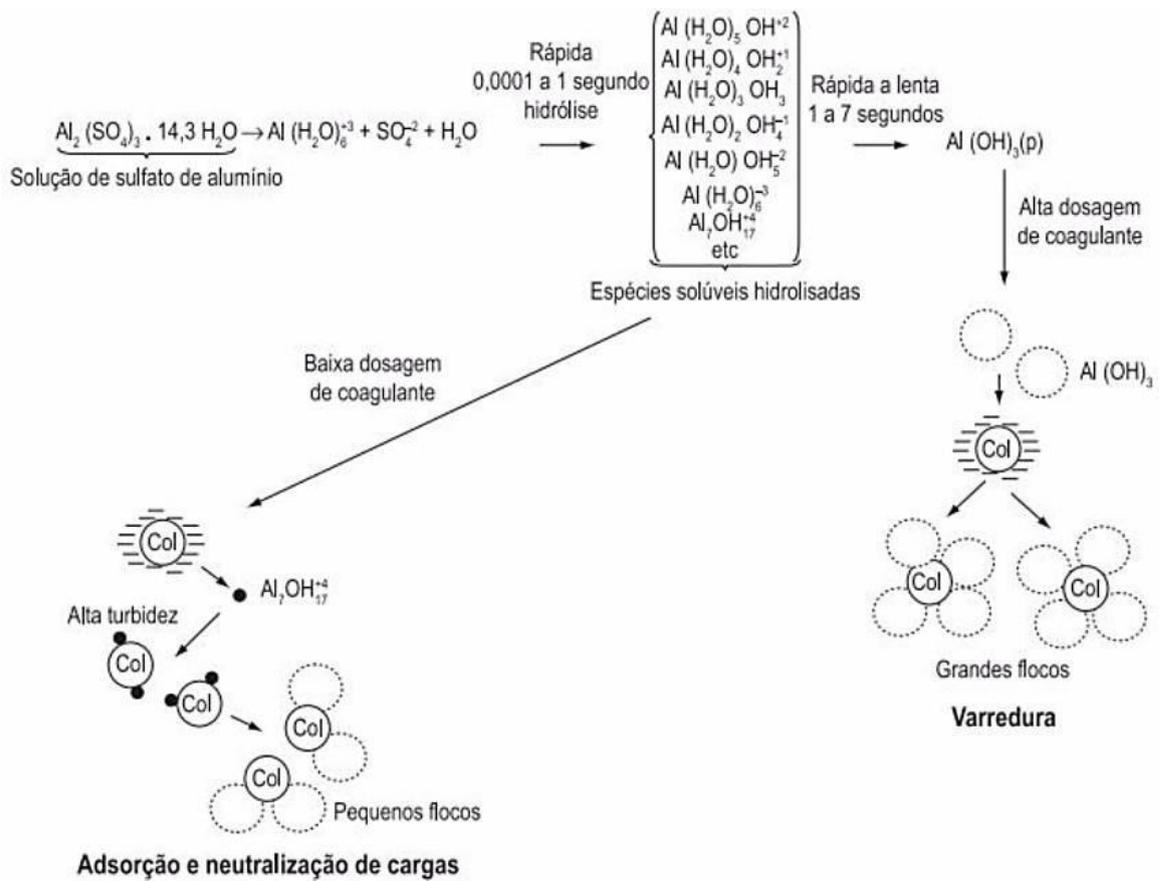


Figura 4 - Esquema de reações de coagulação por adsorção e neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio como coagulante

Fonte: Di Bernardo *et al.*, 2017.

O quadro 01 apresenta um resumo das características de cada um dos mecanismos de desestabilização de partículas com coagulantes metálicos.

Quadro 01 – Características dos mecanismos de desestabilização de partículas com coagulantes metálicos.

Parâmetro	Influência em cada mecanismo			
	Compressão da Dupla Camada	Adsorção e Desestabilização	Formação de Pontes	Varredura
Interações Eletroestáticas	Predominante	Importante	Subordinado	Subordinado
Interações químicas e adsorção	Ausente	Importante	Predominante	Pode ocorrer, mas não é essencial para a remoção
Potencial Zeta ótimo para desestabilização	Próximo a zero	não necessariamente zero	geralmente não é zero	não necessariamente zero
Adição de coagulante em excesso	Sem efeito prejudicial	reestabilização geralmente acompanhada de reversão de carga; pode ficar encoberto pela precipitação	reestabilização devido à cobertura completa da superfície	Sem efeito prejudicial
Relação entre dosagem ótima de coagulante e concentração de partículas	dosagem ideal praticamente independente da concentração de colóide	estequiometria possível, mas nem sempre ocorre	estequiometria entre dosagem e concentração de partículas	dosagem ideal praticamente independente da concentração de colóide
Propriedades físicas do floco produzido	denso, alta resistência ao cisalhamento, mas baixa filtrabilidade por escoamento	flocos com densidade e força de cisalhamento amplamente variáveis	flocos de estrutura tridimensional; baixa resistência ao cisalhamento, mas excelente filtrabilidade por escoamento	flocos com densidade e força de cisalhamento amplamente variáveis

Fonte: Adaptado de Bratby, 2016

### 3.7 Coagulantes

É geralmente aceito que o núcleo da coagulação é o coagulante (BRATBY, 2016). Compostos químicos comumente usados como coagulantes, devido à operação eficaz e simples, incluem sais de ferro, sais de alumínio e polímeros como o PAC (ALENAZI *et al.*, 2020; KURNIAWAN *et al.*, 2020; TANG *et al.*, 2020; EL-TAWHEEL *et al.*, 2023)

#### 3.7.1 Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio é um dos coagulantes mais empregados no Brasil para tratamento de águas de abastecimento. De acordo com a norma ABNT NBR 11176:2021, comercialmente, está disponível como produto líquido e sólido, sob as respectivas fórmulas químicas básicas  $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ , em que “n” representa cerca de 14 a 18 moléculas de água de cristalização, e  $Al_2(SO_4)_3$ .

Em meio aquoso o sulfato de alumínio inicialmente dissocia-se liberando  $Al^{3+}$  no meio. Ferreira Filho (2017) explica que caso ocorresse apenas essa reação o mecanismo de compressão da dupla camada seria preponderante na desestabilização das

partículas coloidais, porém reações de hidrólise sucedem com o cátion  $\text{Al}^{3+}$  viabilizando a formação de espécies mononucleares e polinucleares sendo  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ;  $\text{Al}_8(\text{OH})^{4+}_{20}$  e  $\text{Al}(\text{OH})^{-4}$  as mais significativas do alumínio.

A formação de flocos dá-se, então, pela capacidade destas espécies hidrolisadas adsorverem ou formarem superfícies complexas (AMIRTHARAJAH e O'MELIA, 1990).

O coagulante sulfato de alumínio possui caráter ácido devido à liberação de íons  $\text{H}^+$  no meio durante as reações de hidrólise, consumindo a alcalinidade da água, na proporção de 1,0 mg/L de sulfato de alumínio para cada 0,5 mg/L de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), e, conseqüentemente, a redução do pH. A faixa de trabalho mínima para coagulação com sulfato de alumínio situa-se ao redor de 5,0 a 8,0 (DI BERNARDO *et al.*, 2017; FERREIRA FILHO, 2017; EL-TAWEEL *et al.*, 2023).

### 3.7.2 Sulfato Férrico

Os sais férricos comportam-se na água de maneira semelhante aos de alumínio, ou seja, por meio dos processos de dissociação e hidrólise formando, respectivamente, as espécies  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}/\text{Fe}(\text{OH})^{4+}$ . São ácidos em soluções e consomem alcalinidade do meio (EL-TAWEEL *et al.*, 2023).

Comercialmente o sulfato férrico está disponível na forma líquida contendo, no mínimo, 17% de ferro total solúvel em água ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (ABNT, 2021).

Uma das suas principais vantagens, comparado aos demais coagulantes é a sua aplicabilidade em um amplo intervalo de pH (4,5 a 12).

### 3.7.3 Cloreto de Polialumínio Ferroso

O cloreto de polialumínio (PAC), cuja fórmula geral é  $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$ , pertence a categoria dos coagulantes químicos poliméricos. Apresentam-se como compostos pré-hidrolizados, possuindo grupos hidroxila, que lhe confere maior basicidade do que aos não hidrolisados (ROSINSKA e DABROWSKA, 2021).

PACs comerciais são normalmente disponíveis na basicidade entre 15 e 85%, sendo acima de 60% considerado alta basicidade. Essa refere-se à neutralização de espécies de  $\text{H}^+$  resultantes da reação de hidrólise e afeta o consumo de alcalinidade do coagulante, bem como a prevalência da formação de espécies poliméricas ou monoméricas (CHIAVOLA *et al.*, 2023; LAPOINTE *et al.*, 2021).

### 3.8 Diagramas de Coagulação

Diagramas de coagulação são ferramentas valiosas para identificação das regiões de maior eficiência do processo de coagulação, orientando a escolha do melhor par de valores “pH de coagulação x dosagem de coagulante” que maximize a desestabilização das partículas

Na década de 1980, Amirtharajah e Mills (1982) propuseram uma forma mais simples de se estudar a coagulação baseada nos diagramas de solubilidade do alumínio, associando os mecanismos de coagulação predominantes às condições de coagulação adotadas Figura 05. Di Bernardo *et al.*, (2017) ressalta, entretanto, que as linhas fronteiriças das diferentes regiões variam em função da qualidade da água, uma vez que essas são capazes de mudar as condições do mecanismo de coagulação.

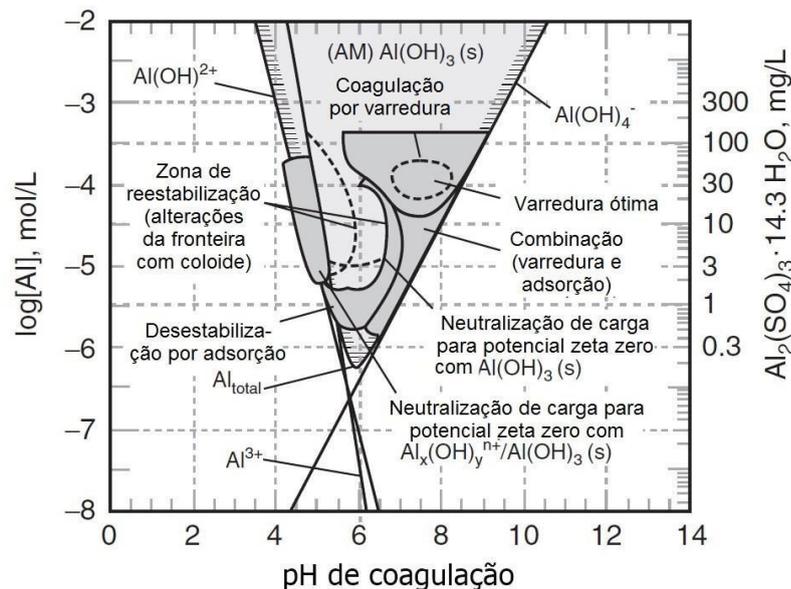


Figura 5 – Mecanismos de Coagulação Associados ao Diagrama de Solubilidade do Sulfato de Alumínio.

Fonte: Di Bernardo *et al.*, 2017

Os diagramas construídos em escala laboratorial por Menezes (2019), demonstraram que o melhor coagulante para as características da água bruta de estudo é o sulfato de alumínio, com valores de remoção de cor e turbidez superiores ao cloreto de poli alumínio (PAC). O sulfato de alumínio apresentou formação de flocos na região ótima com dosagens de 55 a 67,5 mg/L de coagulante, entre pH 6,5 a 6,77. A análise do diagrama, demonstrou que para estes pares de valores a coagulação ocorre no mecanismo de varredura, ideal para estações de ciclo completo. A autora concluiu

que a construção de curvas de dosagem de coagulante *versus* pH são instrumentos que auxiliam no indicativo da qualidade em função do residual de cor aparente e turbidez remanescente.

Maciel e Sabogal-Paz (2017) e Silva e Sabogal-Paz (2019) Elaboraram diagramas de coagulação para avaliar a eficiência do coagulante PAC, determinando o par valor “pH de coagulação x dosagem de coagulante” para remoção de turbidez e cor dentro da faixa de interesse, sem necessidade de correção de pH, resultando em menor custo do tratamento.

Ribeiro (2021) estudou o potencial da moringa oleífera como coagulante no tratamento de águas com cor elevada, obtendo remoções superiores a 70% em várias regiões do diagrama de coagulação.

Kamiwada (2020), por meio da elaboração de diagramas de coagulação, observou a forte influência do pH na eficiência de remoção de turbidez e cor aparente pelo mecanismo de varredura. Concluiu, também, que otimizações das operações unitárias de coagulação e floculação, quando aplicados o melhor par valor indicado pelo diagrama de coagulação, permitem redução do tempo de processo, diminuição da área de sedimentação, aumento da remoção de turbidez e cor aparente ou redução no consumo de coagulante.

A desvantagem dessa metodologia para otimização do processo deve-se ao fato de investigar apenas uma variável negligenciando os efeitos combinados dos fatores.

### **3.9 Planejamento de Experimentos**

Atualmente é uma prática comum otimizar resultados experimentais usando software analítico que pode fornecer uma combinação adequada de parâmetros experimentais para otimização. Diferentemente do método tradicional, a análise estatística permite obter um conjunto de variáveis otimizadas para atingir o resultado esperado (DHRUBO *et al.*, 2023).

O planejamento de experimentos (DOE) é definido como um método estruturado e organizado para determinar relações entre variáveis que influenciam um processo, tendo como principal objetivo a obtenção da quantidade máxima de “informação” limitando ao mesmo tempo o número de observações necessárias (MANDA, 2016)

reduzindo, portanto, o número total de experimentos necessários (WEISSMAN e ANDERSON, 2014).

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) oferece uma abordagem gráfica para a otimização e compreensão da interação entre as variáveis de sistemas e processos (LEE *et al.*, 2022 e DHRUBO *et al.*, 2023).

As estratégias estatísticas multivariadas ainda introduzem um modelo matemático para prever a resposta, verificar a adequação do modelo e determinar as configurações ideais para uma resposta específica (SHOKOOHI *et al.*, 2017). O Design Composto Central Rotacional (DCCR) pode ser considerado o subgrupo mais apropriado do MSR. Esta estratégia é capaz de estimar os parâmetros do modelo quadrático, construir projetos sequenciais, reconhecer a falta de ajuste e adequar o modelo (SAMARGHANDI *et al.*, 2016). Assim, tem recebido ampla aplicação para avaliação de condições experimentais críticas, mesmo no tratamento de água e águas residuais (HUYSMAN *et al.*, 2017)

Em geral, o DCCR contém três pontos principais, incluindo um planejamento fatorial de dois níveis como limites inferior e superior (codificado  $\pm 1$ ), pontos axiais ou em estrela (codificados  $\pm \checkmark$ ) e várias replicações do ponto central (codificado 0). O valor  $\checkmark$  é o raio da esfera circunscrita, que depende do número de fatores. Os pontos centrais auxiliam na estimativa do erro puro, bem como na verificação da adequação do modelo (RODRIGUES & IEMMA, 2014).

Foi relatado que o DOE é usado em vários domínios, como projetos farmacêuticos, otimização de tratamento de água e otimização de engenharia (BASTÜRK e ALVER, 2019; SHOKRI, 2018), com bons graus de sucesso. A maioria dos pesquisadores aplicou DCCR para otimização e modelagem de processos químicos, como o processo Fenton (MAHTAB *et al.*, 2021; SAEED *et al.*, 2015) e processos eletro-Fenton (BUSTILLO-LECOMPTE e MEHRVAR, 2016; BASTURK *et al.*, 2020). Outros pesquisadores também aplicaram o DOE a processos biológicos e físicos, como processos de membrana (SRIVASTAVA *et al.*, 2021), processos de adsorção (KOZIK *et al.*, 2019) processos de coagulação (WANG *et al.*, 2014; VARANK *et al.*, 2016) e processos biológicos (BUSTILLO-LECOMPTE e MEHRVAR, 2016). A maioria das técnicas de modelagem tem bom desempenho de previsão em comparação com resultados experimentais, com valores de  $R^2 > 0,8$  relatados.

Para otimização da coagulação por meio da MSR, ainda são insipientes as publicações. Destaca-se aqui os estudos de Frota (2022) que demonstrou a eficiência da aplicação desta metodologia por um DCCR na construção do diagrama de coagulação para diferentes coagulantes, e SUQUET *et al.* (2021) que desenvolveu modelos aprimorados de coagulação baseados na metodologia de superfície de resposta para otimizar a coagulação de águas de duas captações superficiais.

### **3.10 Função Desirability**

A função Desirability é empregada para otimizar simultaneamente as variáveis independentes de um processo. Cada uma das respostas dos modelos individuais é transformada em desejabilidades individuais ( $d_i$ ), tal que  $d_i$  pertença ao intervalo de 0 a 1 (PIMENTA *et al.*, 2015; MANIMARAM, 2022).

A desejabilidade combinada (D) é obtida por meio da média geométrica das desejabilidades individuais. Seu valor varia entre 0 e 1, com 1 representando as condições mais otimizadas para maximização da variável resposta (MALIKA e SONAWANE, 2022).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os equipamentos, os materiais e a metodologia que foram utilizados para a execução dessa pesquisa. As etapas que foram desenvolvidas para obtenção dos resultados estão ilustradas no fluxograma da Figura 06.

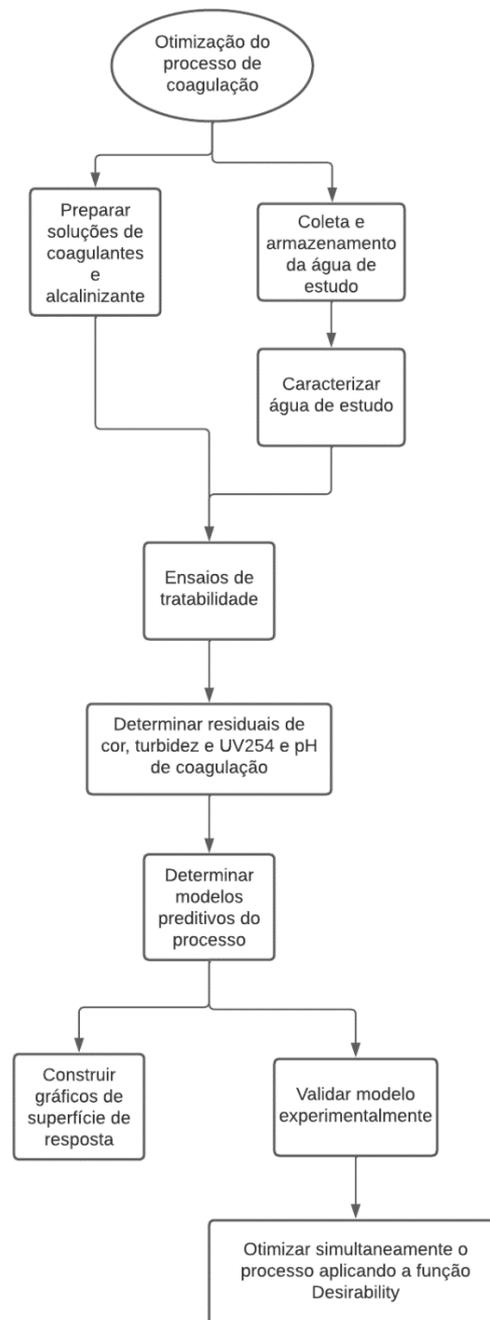


Figura 6 – Fluxograma das etapas do estudo

Fonte: Autora, 2022

#### 4.1 Equipamentos

Para a execução dos ensaios, medição e estudo dos parâmetros foram utilizados os equipamentos indicados no quadro 2.

Quadro 2 – Equipamentos utilizados para os ensaios de tratabilidade e análises de água.

Equipamento	Marca	Modelo
Reator Estático	MILAN	JT-303M
pHmetro	HACH	HQ11D
Espectrofotômetro UV-Visível	HACH	DR6000
Turbidímetro	HACH	2100N

Fonte: Autor (2023).

O parâmetro turbidez foi determinado pelo método nefelométrico e expresso em unidades de turbidez (uT). A cor aparente foi determinada por espectrofotometria e expressa em mg/L de Pt-Co.

As operações de coagulação, floculação e decantação para elaboração dos diagramas de coagulação foram simuladas no Jar Test equipado com 6 jarros com capacidade de 2L, cada, providos de eixos com paletas e rotações de variação programável entre 20 e 600 rpm. As condições para a execução dos ensaios, discriminadas na tabela 1, são referentes às da escala real da ETA que trata a água de estudo e correspondem aos valores usualmente aplicados as plantas de ciclo completo.

Tabela 1 – Parâmetros de programação dos ensaios em Jarrest.

Parâmetro	Valor Programado	Unidade
<b>Tempo de Mistura Rápida</b>	60	Segundos
<b>Gradiente de Mistura Rápida</b>	1000	s <sup>-1</sup>
<b>Gradiente de Floculação</b>	20	s <sup>-1</sup>
<b>Tempo de Floculação</b>	20	Minutos
<b>Velocidade de Sedimentação (VS1)</b>	3	cm/min
<b>Tempo de Sedimentação (VS1)</b>	5	Minutos

Fonte: Autor (2023).

## 4.2 Produtos Químicos

Foram utilizados produtos químicos descritos abaixo para realização dos ensaios de tratabilidade.

Coagulantes:

- Sulfato de Alumínio;
- Sulfato Férrico;
- Cloreto de Polialumínio Ferroso (10/12)

Alcalinizante

- Cal Hidratada

Todas as soluções de coagulantes e de alcalinizante foram preparadas na concentração de 1% (m/v), conforme dados apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros adotados no preparo das soluções de coagulantes e alcalinizante.

<b>Produto</b>	<b>Alíquota</b>	<b>Volume</b>	<b>Concentração</b>
<b>Sulfato de Alumínio</b>	50	1	1%
<b>Sulfato Férrico</b>	20	1	1%
<b>PAC Ferroso</b>	20	1	1%
<b>Cal Hidratada</b>	20	1	1%

Fonte: Autor (2023).

## 4.3 Coleta, armazenamento e caracterização da água bruta

### 4.3.1 Coleta e armazenamento

A água bruta ensaiada foi coletada na caixa de chegada da ETA, antes da aplicação de qualquer produto químico. Coletou-se um volume de 1000 L de água bruta que ficou armazenado em uma caixa d'água de 1000 L, durante o período dos ensaios.



Fonte: Autor (2023).

Figura 7 – Acondicionamento da água bruta ensaiada.

#### 4.3.2 Caracterização

Para a caracterização da água bruta foram analisados os parâmetros físico-químicos: turbidez, cor aparente, pH, temperatura, alcalinidade, UV 254 e COT.

#### 4.4 Planejamento Experimental por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

As condições experimentais para construção dos diagramas de coagulação foram determinadas por meio do software online Protimiza Experimental Design (<http://experimental-design.protimiza.com.br/>) com a metodologia de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

As dosagens de coagulante e alcalinizante foram selecionadas como variáveis de entrada, a fim de obter-se as variações de cor aparente, turbidez e pH da água coagulada como respostas. A figura 8 ilustra o planejamento experimental.

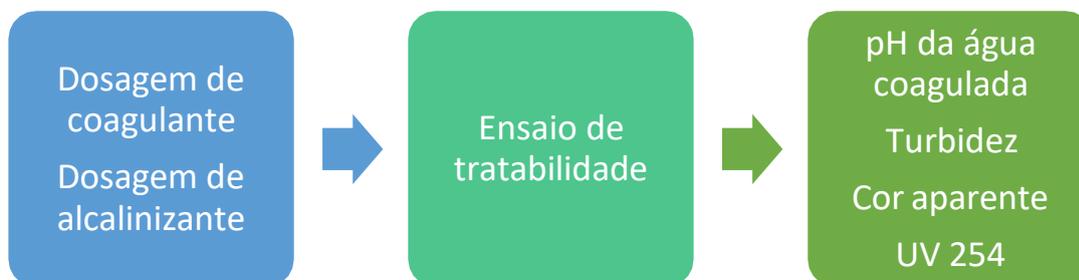


Figura 8 – Variáveis de entrada e de resposta adotadas para o planejamento experimental.

Fonte: Autor (2023).

#### 4.5 Ensaio no equipamento estático

Os ensaios de tratabilidade foram realizados em acordo com os parâmetros definidos no planejamento experimental, os quais estão discriminados na tabela 3.

Tabela 3 – Planejamento DCCR

Ensaio	Valores Codificados		Valores Reais	
	Coagulante (mg/L)	Alcalinizante (mg/L)	Coagulante (mg/L)	Alcalinizante (mg/L)
1	-1	-1	40	22,4
2	1	-1	100	22,4
3	-1	1	40	128
4	1	1	100	128
5	-1,41	0	27,57	75,2
6	1,41	0	112,43	75,2
7	0	-1,41	70	0,53
8	0	1,41	70	149,87
9	0	0	70	75,2
10	0	0	70	75,2
11	0	0	70	75,2

Fonte: Autor (2023).

#### 4.6 Modelos matemáticos e otimização

Os resultados obtidos foram alimentados no software online Protimiza, no qual foram geradas as representações gráficas para as superfícies de respostas e modelos matemáticos do processo, após tratamento estatístico considerando significância e análise de variância (ANOVA). Posteriormente foi utilizada a função de desirability, por meio do software Excell, para obtenção das condições de otimização simultânea das variáveis independentes.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o capítulo em questão foi seguida a formatação de artigo de revista. O artigo aqui apresentado foi intitulado de: OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS COM METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: ESTUDO DE COAGULANTES INORGÂNICOS PARA REMOÇÃO DE COR, TURBIDEZ E UV 254

**Artigo: Otimização do processo de coagulação de águas superficiais com metodologia de superfície de resposta: estudo de coagulantes inorgânicos para remoção de cor, turbidez e UV 254**

Resumo

O processo de coagulação de águas superficiais foi otimizado com a metodologia de superfície de resposta (MSR). Empregou-se um planejamento composto central rotacional para descrever a dependência das variáveis dosagem de coagulante e de alcalinizante na remoção de cor, turbidez e UV254. O modelo quadrático, verificado por ensaios com precisão acima de 90%, ajustou-se bem ao processo. A função Desirability estabeleceu as dosagens ótimas para a otimização simultânea. O PAC ferroso alcançou as maiores remoções com menores dosagens, comparado aos sulfatos de alumínio e férrico. As dosagens de coagulante e de alcalinizantes otimizadas em mg/L foram, respectivamente, de 78 e 0,5 para o PAC; 105 e 68 para sulfato férrico e 105 e 29 para o sulfato de alumínio, correspondentes a residuais de, aproximadamente 19; 1 e 0,1 para cor (mg/L Pt-Co), turbidez (uT) e UV254 ( $m^{-1}$ ), respectivamente. A MSR foi validada como uma ferramenta útil em ETAs, oferecendo respostas ágeis com economia de recursos.

Palavras chave: coagulação, MSR, DCCR, otimização simultânea, tratamento de água, função Desirability.

**Optimization of the surface water coagulation process with response surface methodology: study of inorganic coagulants to remove color, turbidity and UV 254**

## Abstract

The surface water coagulation process was optimized using the response surface methodology (RSM). A central rotational composite design was used to describe the dependence of the coagulant and alkalinizer dosage variables on the removal of color, turbidity and UV254. The quadratic model, verified by tests with accuracy above 90%, adjusted well to the process. The Desirability function established the optimal dosages for simultaneous optimization. Ferrous PAC achieved the highest removals with lower dosages, compared to aluminum and ferric sulfates. The optimized dosages of coagulant and alkalinizers in mg/L were, respectively, 78 and 0.5 for PAC; 105 and 68 for ferric sulfate and 105 and 29 for aluminum sulfate, corresponding to residuals of approximately 19; 1 and 0.1 for color (mg/L Pt-Co), turbidity (uT) and UV254 ( $m^{-1}$ ), respectively. MSR has been validated as a useful tool in ETAs, offering agile responses with resource savings.

Keywords: coagulation, MSR, DCCR, simultaneous optimization, water treatment, Desirability function

## Introdução

A Lei 14.026/2020, conhecida como novo marco legal do saneamento, gerou pressões e desafios para o setor, uma vez que tem como principal objetivo a ser alcançado a universalização dos serviços de saneamento básico.

O acesso à água potável é também um componente chave para cumprir as metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) estipuladas pela Agenda 2030 das Nações Unidas (CHIAVOLA *et al.*, 2023 e ONU, 2015).

Com as metas ambiciosas de garantir que 99% da população brasileira tenha acesso a água potável e 90% ao tratamento e coleta de esgoto até 2033, as companhias de saneamento intensificaram a busca por recursos a fim de garantir novos investimentos na infraestrutura dos serviços.

Ao mesmo tempo, a abertura do mercado para a iniciativa privada, também promovida pela referida legislação, implementou a concorrência no setor de saneamento, levando à necessidade de melhoria da qualidade dos serviços prestados e a busca por maior eficiência em suas operações.

No âmbito do tratamento de água, a estes dois últimos desafios, somam-se o aumento do consumo de água, seja por alterações climáticas ou pelo aumento da população (HASHIM *et al.*, 2017; ZUBAIDE *et al.*, 2019), a degradação da qualidade da água dos mananciais destinados ao abastecimento público e as necessidades de atendimento a um padrão de potabilidade cada vez mais exigente e de implementação de medidas para produção de água segura (LIN *et al.*, 2023).

Pesquisa realizada em 20 estações de tratamento de água em operação concluiu que o pré tratamento químico antes da filtração – coagulação - é mais crítico para o sucesso do que as instalações físicas da planta (CLEASBY *et al.* 1989).

A necessidade de uma compreensão profunda do processo de coagulação justifica-se no fato de que muitas águas usadas para abastecimento público possuem diversos contaminantes e os requisitos para remoção de particulados e orgânicos tornam-se cada vez mais rigorosos.

Otimizar o processo de coagulação traz diversos benefícios ao processo de tratamento, desde a redução de custo até a produção de água segura.

A qualidade dos recursos hídricos continentais, além de depender de suas características naturais, está diretamente relacionada com os usos múltiplos da água e o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica. As principais fontes não antropogênicas são os processos hidrogeológicos, as mudanças climáticas e desastres naturais. As influências antropogênicas incluem despejos de efluentes domésticos e industriais, deflúvio superficial urbano e agrícola e a pecuária (KOUL *et al.*, 2022).

Os poluentes químicos, físicos ou biológicos lançados na água podem ser depositados no leito d'água ou permanecerem suspensos na água, causando turbidez, que está entre as características mais comuns de água poluída (ALENAZI *et al.*, 2020; ABDULLA *et al.*, 2020).

Na última década a portaria que regula o padrão de potabilidade da água passou por quatro revisões, sendo, ao longo destas, alterado o critério para aceitação do parâmetro turbidez pós-filtração, que se tornou mais exigente (BRASIL, 2004; BRASIL, 2011; BRASIL, 2017 E BRASIL, 2021).

A crescente preocupação com esse parâmetro deve-se ao fato dessas partículas poderem ser um veículo de substâncias tóxicas e microorganismos, além de causar problemas estéticos (USEFI, e ASADI-GHALHARI, 2019; CHIAVOLA *et al.*, 2023).

O processo das estações de tratamento de água (ETAs) deve promover a eliminação ou redução das concentrações de elementos químicos e microorganismos a níveis não prejudiciais à saúde humana (DI BERNARDO *et al.*, 2017). A remoção dessas partículas deve ocorrer na etapa de coagulação/floculação seguida de decantação e filtração. (FERREIRA FILHO, 2017).

A coagulação é um processo pelo qual promove-se a desestabilização das partículas presentes na água, possibilitando sua remoção nas etapas subsequentes do tratamento (ALENAZI *et al.*, 2020; LIBÂNIO, 2016). É considerado o processo mais acessível e adequado para fornecer água potável em países em desenvolvimento devido ao seu baixo custo e fácil operação (ZHOU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019; HASHIM, 2019).

Os sais férricos e de alumínio e os polímeros são os coagulantes mais utilizados devido ao seu baixo custo e eficácia (BRATBY, 2016; KURNIAWAN *et al.*, 2020; ROSINSKA e DABROWSKA, 2021)

A variedade de coagulantes comerciais e as diferentes características de água bruta, dificultam a escolha do produto adequado para águas superficiais específicas (JASSIM *et al.*, 2020). Como a dosagem dos coagulantes utilizados está amplamente relacionada aos padrões de qualidade da água distribuída, bem como aos custos de tratamento, sua estratégia de seleção é de grande importância prática para o gerenciamento de estações de tratamento de água (ETA). (LI *et al.*, 2022; KURNIAWAN *et al.*, 2020).

Além da turbidez, outros parâmetros como cor aparente e absorvância ultravioleta a 254 nm (UV 254) podem ser usados para avaliar o desempenho da coagulação (SUQUET, *et al.*, 2021).

O método clássico utilizado em otimizações de processos envolve a alteração de uma variável por vez, sendo demorado e dispendioso. Além disso, não identifica intrinsecamente o comportamento das interações entre as variáveis envolvidas.

Nesse sentido, a metodologia de superfície de resposta (MSR) permite que os experimentos sejam realizados em uma ampla variedade de condições, enquanto reduz o número total de ensaios necessários, construindo modelos com precisão comparados à função de resposta verdadeira em uma área próxima ao ótimo, usando fatores independentes como parâmetros do processo. (RODRIGUES & IEMMA, 2014).

Nesse trabalho, o efeito de variáveis independentes, dosagem de coagulante e de alcalinizante, e as interações dessas variáveis na remoção de turbidez, cor e UV 254 de águas superficiais foi estudado e otimizado de forma multiobjetiva, aplicando planejamento de experimentos utilizando metodologia de superfície de resposta.

Apesar de poder ser uma ferramenta útil na operação de ETAs, o uso da MSR ainda é insipiente no âmbito do tratamento de água. Desta forma, esse trabalho demonstra como sua aplicação possibilita respostas ágeis e assertivas para tomadas de decisões, visando a otimização do processo, economizando recursos humanos e materiais e aumentando a eficiência operacional.

### **Materiais e Métodos**

As soluções comerciais dos coagulantes sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio ferroso (PAC Ferroso) 12% e sulfato férrico, e do alcalinizante cal hidratada foram utilizadas na concentração de 1% (m/v) durante os ensaios de tratabilidade em jarrest equipado com 6 jarros com capacidade de 2L, cada, providos de eixos com paletas e rotações de variação programável entre 20 e 600 rpm. Os parâmetros turbidez e pH foram medidos usando turbidímetro de bancada (HACH2100Q) e medidor de pH de precisão (HACH HQ11D), respectivamente. A cor, em Co-Pt, foi avaliada utilizando um espectrofotômetro UV (HACH DR6000).

A água de ensaio foi coletada no ponto de amostragem do laboratório da ETA, armazenada em tanque de 1000L e caracterizada para os parâmetros cor aparente, turbidez, pH, temperatura e alcalinidade.

#### **Ensaio de tratabilidade**

Um aparelho de teste de jarro foi usado para conduzir estudos de coagulação. O volume de 2000 ml de água bruta foi colocado em cada jarro. As alíquotas de coagulante e alcalinizante com dosagens variadas de 27,57 mg/L a 112,43 mg/L e

0,53 mg/L a 149,87 mg/L, respectivamente, foram adicionadas e dado início ao ensaio, cujos parâmetros de programação do Jarrest estão apresentados na tabela 4, coletando-se amostras para determinação do pH de coagulação e dos residuais de cor aparente, turbidez e UV 254.

Tabela 4 – Parâmetros de programação dos ensaios em jarrest.

Parâmetro	Mistura Rápida		Floculação		Sedimentação	
	Tempo	Gradiente	Tempo	Gradiente	Tempo	Velocidade
<b>Programação</b>	60 segundos	1000 s <sup>-1</sup>	20 minutos	20 s <sup>-1</sup>	5 minutos	3 cm/min

Fonte: Autor (2023).

### Planejamento Experimental

Para a otimização eficiente das variáveis (dosagem de coagulante e dosagem de alcalinizante) que influenciam diretamente o mecanismo de coagulação, foi utilizado o software estatístico Protimiza para realizar o delineamento do experimento em esquema fatorial. O delineamento composto central rotacional foi utilizado por ser o recomendado quando se estuda duas variáveis independentes (RODRIGUES & IEMMA, 2014). As variáveis foram alteradas entre cinco valores codificados, resultando na exigência de 11 execuções independentes (4 repetições fatoriais, 4 axiais e 3 de ponto central) para avaliar os resultados e otimizar. Dois níveis foram selecionados para as variáveis de entrada e a resposta aos parâmetros turbidez (uT), pH, UV 254 (m<sup>-1</sup>) e cor (mg/L Co-Pt) observadas.

### Análise Estatística

Os resultados experimentais foram ajustados em uma equação de segunda ordem, Equação 1:

$$y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_{11}X_1^2 + \beta_2X_2 + \beta_{22}X_2^2 + \beta_{12}X_1X_2 \quad \text{Equação (1)}$$

onde y é a resposta prevista e  $\beta$  são os coeficiente relativos aos efeitos dos fatores. Para determinação do modelo, os resultados foram analisados pelo software protimiza, gerando dados referentes ao t-calculado e ao p-valor permitindo a avaliação da significância dos efeitos dos fatores nas variáveis dependentes. Adotou-se neste estudo o nível de significância de 90%. Desta forma fatores cujos efeitos apresentaram p-valor menor que 0,1000 foram eliminados do modelo proposto.

Com o modelo determinado, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) para verificar o ajuste do modelo ao processo estudado. Em seguida foram gerados com o

auxílio do software os gráficos de superfície de resposta e realizada a validação dos modelos com ensaios em triplicata com dosagens de 80 mg/L para os coagulantes e 0,50 mg/L de alcalinizante.

#### Otimização multiobjetivo

A função Desirability foi utilizada para obtenção dos melhores resultados que maximizem a remoção de cor, turbidez e UV254, permitindo a otimização simultânea do processo de coagulação e a determinação do coagulante mais eficiente, a partir das respostas e desejabilidades obtidas. Para essa avaliação foram definidos valores máximos, mínimos e alvos, sendo, respectivamente, para cor: 25 / 0 / 15; turbidez: 3 / 0 / 0,5; UV254: 0,15 / 0 / 0,05. Definiu-se também a faixa de pH entre 6,5 e 10,0, com alvo em 7,0 a fim de evitar a liberação de formas solúveis de alumínio.

### Resultados e Discussão

#### Caracterização da água bruta

A tabela 5 apresenta os resultados da caracterização da água de estudo, estando compatíveis com a qualidade da água tratada na ETA em 95% do tempo. Picos de turbidez podem ocorrer devido a sazonalidade, entretanto não são episódios de longa duração. Pelas características de cor e turbidez, nota-se a incompatibilidade dessa água com a tecnologia de tratamento por ciclo completo aplicada na ETA que a trata. De acordo com Di Bernardo *et al.* (2017), a tecnologia de ciclo completo é indicada para o tratamento de água de mananciais superficiais nos quais os valores de turbidez sejam superiores a 10 uT em 95% do tempo.

Tabela 5 – Caracterização da água bruta.

Parâmetro	Cor aparente (mg/L de Pt-Co)	Turbidez (uT)	Temperatura (°C)	pH	Alcalinidade (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	UV 254 (m <sup>-1</sup> )	COT (mg/L)
Resultado	185	7,06	24,5	7,09	33,8	0,31	11,37

Fonte: Autor (2023)

#### Ensaio de tratabilidade – Cloreto de Polialumínio Ferroso

O desempenho do PAC ferroso como coagulante foi avaliado para a água de estudo. Os resultados experimentais com os valores residuais de cor, UV 254 e turbidez, e o pH de coagulação são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tratabilidade com PAC Ferroso

Ensaio	Valor Codificado		Valor Real (mg/L)		Resultados			
	PAC	Cal	PAC	Cal	Cor	Turbidez	pH	UV 254
1	-1	-1	40	22,4	85	4,60	6,98	0,15
2	1	-1	100	22,4	35	1,54	6,67	0,08
3	-1	1	40	128	185	9,30	10,42	0,30
4	1	1	100	128	73	6,50	9,92	0,16
5	-1,41	0	27,57	75,2	196	10,00	9,00	0,32
6	1,41	0	112,43	75,2	32	1,53	8,76	0,12
7	0	-1,41	70	0,53	29	1,80	6,36	0,09
8	0	1,41	70	149,87	100	7,48	10,49	0,22
9	0	0	70	75,2	113	8,20	9,51	0,20
10	0	0	70	75,2	115	8,84	9,63	0,21
11	0	0	70	75,2	100	8,85	9,44	0,20

Fonte: Autor (2023)

A análise estatística dos dados não demonstrou significância ao nível de 90% para o fator dosagem de coagulante quadrático relativa aos parâmetros cor e UV 254. Para os parâmetros turbidez e pH o efeito da interação entre as dosagens de coagulante e alcalinizantes não foram significativos. A tabela 7 apresenta os dados brutos da análise de regressão para cada parâmetro. Os efeitos padronizados considerados para os modelos ajustados, tabela 8, podem ser observados na figura 9 de (a) a (d).

Tabela 7 - Dados da regressão para as variáveis respostas: PAC Ferroso.

Variável	Fatores	Média	Dosagem Coagulante		Dosagem Alcalinizante		$x_1 \cdot x_2$
			Linear $x_1$	Quadrático $x_1^2$	Linear $x_2$	Quadrático $x_2^2$	
Cor	Coefficiente	109,3 3	-49,24	3,65	29,8	-21,1	-15,5
	t calc	13,56	-9,97	0,62	6,03	-3,59	-2,22
	p-valor	0,000 0	0,0002	0,5623	0,0018	0,0157	0,0772
Turbidez	Coefficiente	8,63	-2,23	-1,36	2,21	-1,92	8,63
	t calc	14,32	-6,04	-3,1	5,99	-4,38	14,32
	p-valor	0,000 0	0,0018	0,0268	0,0019	0,0071	0,0000
pH	Coefficiente	9,53	-0,14	-0,36	1,57	-0,59	-0,05
	t calc	85,93	-2,12	-4,48	23,07	-7,3	-0,49
	p-valor	0,000 0	0,0879	0,0065	0,0000	0,0008	0,6418
UV 254	Coefficiente	0,2	-0,06	0,01	0,05	-0,03	-0,02
	t calc	20,76	-10,24	0,89	8,81	-3,78	-2,06
	p-valor	0,000 0	0,0002	0,4119	0,0003	0,0129	0,0947

Fonte: Autor (2023)

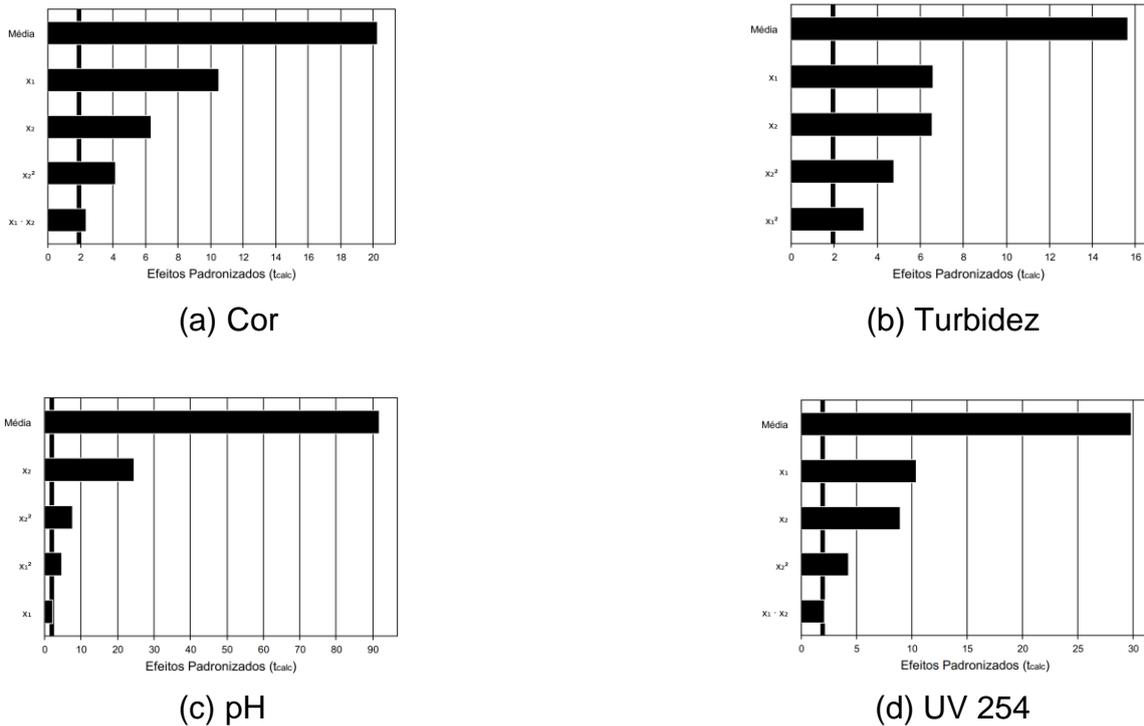


Figura 9 - Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados: PAC Ferroso.

Tabela 8 – Modelos ajustados: PAC Ferroso

Variáveis	Modelos
Cor	$Y_1 = 112,76 - 49,24 x_1 + 29,80 x_2 - 22,18 x_2^2 - 15,50 x_1 x_2$
Turbidez	$Y_2 = 8,63 - 2,23 x_1 - 1,36 x_1^2 + 2,21 x_2 - 1,92 x_2^2$
pH	$Y_3 = 9,53 - 0,14 x_1 - 0,36 x_1^2 + 1,57 x_2 - 0,59 x_2^2$
UV 254	$Y_4 = 0,21 - 0,06 x_1 + 0,05 x_2 - 0,03 x_2^2 - 0,02 x_1 x_2$

Fonte: Autor (2023)

A ANOVA do modelo quadrático indicou valores de  $F_{\text{regressão/resíduos}} \geq F_{\text{tab}}$  e  $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \leq F_{\text{tab}}$  para os modelos referentes aos parâmetros cor e pH, demonstrando a significância estatística dos modelos, conseqüentemente estes possuem bom ajuste ao processo. Já os modelos referentes aos parâmetros UV 254 e turbidez apresentaram  $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \geq F_{\text{tab}}$ , fato que pode acontecer quando o erro puro é muito baixo, nestes casos os valores obtidos para o erro puro foram, respectivamente, 0,0 e 0,3. Os coeficiente de regressão obtido pela ANOVA apresentaram  $R^2$  acima de 95%, conforme dados da tabela 9, indicando que os dados experimentais previstos foram bastantes satisfatórios.

Tabela 9 – Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de resposta: PAC Ferroso

	Cor	Turbidez	pH	UV-254
Freg/res / Ftab	43,5 / 3,18	28,5 / 3,18	170,5 / 3,18	52,9 / 3,18
p-valor	0,00014	0,00048	0,00000	0,00008
$F_{fa/ep} \leq F_{tab}$	3,5 / 9,24	9,3 / 9,24	4,7 / 9,24	21,0 / 9,24
p-valor	0,23657	0,09896	0,18186	0,04607
R <sup>2</sup>	96,67	95,00	99,13	97,24

Fonte: Autor (2023)

Para estudar os efeitos interativos na coagulação, foram construídos gráficos 3D traçando a remoção de cor, de turbidez e de UV 254 e o pH de coagulação em relação às variáveis independentes, dosagem de coagulante e de alcalinizante, conforme mostrado na figura 10. Desta infere-se que residuais de cor e turbidez adequados para água decantada são obtidos a partir das dosagens mínimas de coagulante e de alcalinizante de 70 e 0,50 mg/L, respectivamente, referentes ao pH de coagulação de 6,14. Foram obtidos residuais abaixo de 1,5; 0,5 e 0,05 para os parâmetros cor, turbidez e UV254, respectivamente, nas dosagens de PAC de 97 mg/L, 82 mg/L e 90 mg/L, respectivamente. Todas com 0,5 mg/L de alcalinizante.

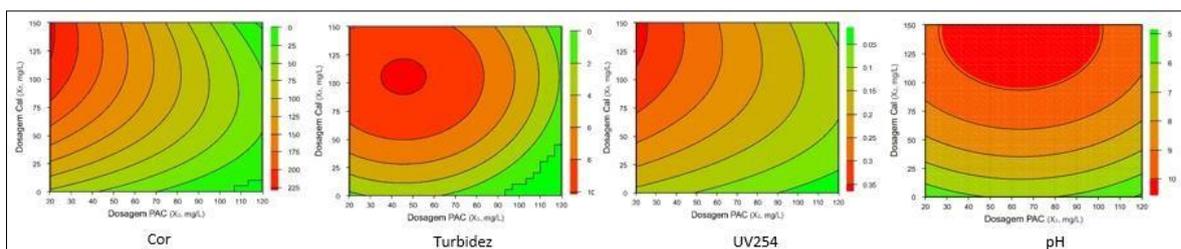


Figura 10 – Gráficos de superfície de resposta para o PAC Ferroso

Fonte: Autor (2023)

### Ensaio de tratabilidade – Sulfato Férrico

Os resultados experimentais com os valores residuais das variáveis respostas obtidos com a aplicação do sulfato férrico como coagulante da água de estudo são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tratabilidade com Sulfato Férrico

Ensaio	Valores Codificados		Valores Reais (mg/L)		Resultados			
	Sulfato Férrico	Cal	Sulfato Férrico	Cal	Cor	Turbidez	pH	UV 254
1	-1	-1	40	22,4	110	5,05	6,85	0,28
2	1	-1	100	22,4	21	0,94	6,12	0,08
3	-1	1	40	128	70	3,94	10,45	0,19
4	1	1	100	128	24	1,20	9,96	0,15
5	-1,41	0	27,57	75,2	98	5,00	9,88	0,25
6	1,41	0	112,43	75,2	22	1,20	7,73	0,13
7	0	-1,41	70	0,53	30	1,64	6,15	0,15
8	0	1,41	70	149,87	32	1,75	10,87	0,14
9	0	0	70	75,2	45	1,55	9,78	0,16
10	0	0	70	75,2	44	1,57	9,86	0,16
11	0	0	70	75,2	49	1,81	9,78	0,17

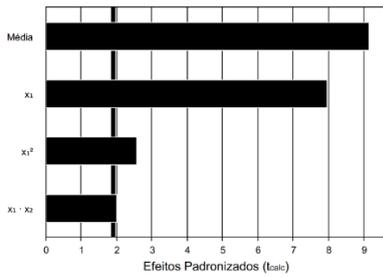
Fonte: Autor (2023)

A análise estatística dos dados não demonstrou significância ao nível de 90% para o fator dosagem de alcalinizante linear e quadrático relativa às variáveis cor, turbidez e UV 254. Para a variável pH o efeito da interação entre as dosagens de coagulante e alcalinizantes não foram significativos. A tabela 11 apresenta os dados brutos da análise de regressão para cada variável. Os efeitos padronizados considerados para os modelos ajustados, tabela 12, podem ser observados na figura 11 de (a) a (d).

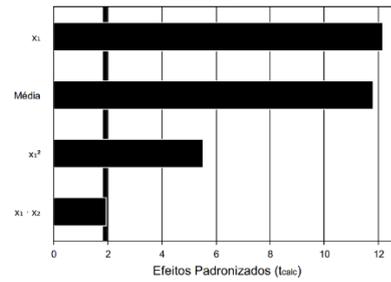
Tabela 11- Dados brutos da regressão para as variáveis de resposta, Sulfato Férrico.

Variável	Fatores	Média	Dosagem Coagulante		Dosagem Alcalinizante		$x_1 \cdot x_2$
			Linear $x_1$	Quadrático $x_1^2$	Linear $x_2$	Quadrático $x_2^2$	
Cor	Coefficiente	46	-30,31	9,69	-4,27	-4,81	10,75
	t calc	7,68	-8,26	2,22	-1,16	-1,1	2,07
	p-valor	0,0006	0,0004	0,0772	0,2967	0,3205	0,0929
Turbidez	Coefficiente	1,64	-1,53	0,82	-0,09	0,12	0,34
	t calc	7,41	-11,26	5,1	-0,64	0,76	1,78
	p-valor	0,0007	0,0001	0,0038	0,5507	0,4839	0,1345
pH	Coefficiente	9,81	-0,53	-0,58	1,76	-0,73	0,06
	t calc	45,82	-4,06	-3,71	13,46	-466	0,32
	p-valor	0,0000	0,0097	0,0138	0,0000	0,0055	0,7592
UV 254	Coefficiente	0,16	-0,05	0,02	0,0000	-0,01	0,04
	t calc	24,78	-12,93	3,23	-1,01	-1,14	7,14
	p-valor	0,0000	0,0000	0,0232	0,3608	0,3054	0,0008

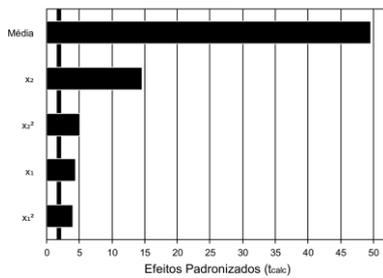
Fonte: Autor (2023)



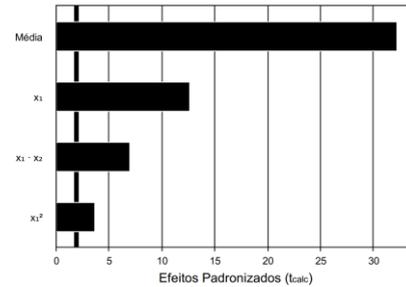
(a) Cor



(b) Turbidez



(c) pH



(d) UV 254

Figura 11 – Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados, Sulfato Férrico

Tabela 12 – Modelos Ajustados

Variáveis	Modelos
Cor	$Y_1 = 41,47 - 30,31 x_1 + 11,10 x_1^2 + 10,75 x_1 x_2$
Turbidez	$Y_2 = 1,76 - 1,53 x_1 + 0,79 x_1^2 + 0,34 x_1 x_2$
pH	$Y_3 = 9,81 - 0,53 x_1 - 0,58 x_1^2 + 1,76 x_2 - 0,73 x_2^2$
UV 254	$Y_4 = 0,16 - 0,05 x_1 + 0,02 x_1^2 + 0,04 x_1 x_2$

Fonte: Autor (2023)

A ANOVA do modelo quadrático indicou valores de  $F_{\text{regressão/resíduos}} \geq F_{\text{tab}}$  e  $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \leq F_{\text{tab}}$  para os modelos referentes às variáveis turbidez e UV 254, demonstrando a significância estatística dos modelos, conseqüentemente estes possuem bom ajuste ao processo. Já os modelos referentes às variáveis cor e pH apresentaram  $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \geq F_{\text{tab}}$ , fato que pode acontecer quando o erro puro é muito baixo, nestes casos os valores obtidos para o erro puro foram, respectivamente, 14,0 e 0,0. Entretanto ambas variáveis apresentaram p-valor menor que 0,1000. Os coeficiente de regressão obtido pela ANOVA apresentaram  $R^2$  acima de 90%, conforme dados da tabela 13, indicando que os dados experimentais previstos foram bastantes satisfatórios.

Tabela 13 – Análise de Variância (ANOVA) para os parâmetros de resposta, sulfato férrico

	Cor	Turbidez	pH	UV-254
Freg/res / F <sub>tab</sub>	24,6 / 3,07	60,9 / 3,07	66,2 / 3,18	74,0 / 3,07
p-valor	0,00043	0,00002	0,00004	0,00001
F <sub>fa/ep</sub> ≤ F <sub>tab</sub>	22,9 / 9,29	8,0 / 9,29	81,7 / 9,24	7,2 / 9,29
p-valor	0,04240	0,11454	0,01213	0,12573
R <sup>2</sup>	91,32	96,31	97,79	96,94

Fonte: Autor (2023)

Os gráficos das superfícies de respostas obtidos estão apresentados na figura 12. Infere-se que residuais de cor e turbidez adequados para água decantada são obtidos a partir das dosagens mínimas de coagulante e de alcalinizante de 80 e 0,50 mg/L, respectivamente, referentes ao pH de coagulação de 5,61. Foram obtidos residuais abaixo de 1,5; 0,5 e 0,05 para os parâmetros cor, turbidez e UV254, respectivamente, na dosagem de sulfato férrico de 108 mg/L, com 0,5 mg/L de alcalinizante.

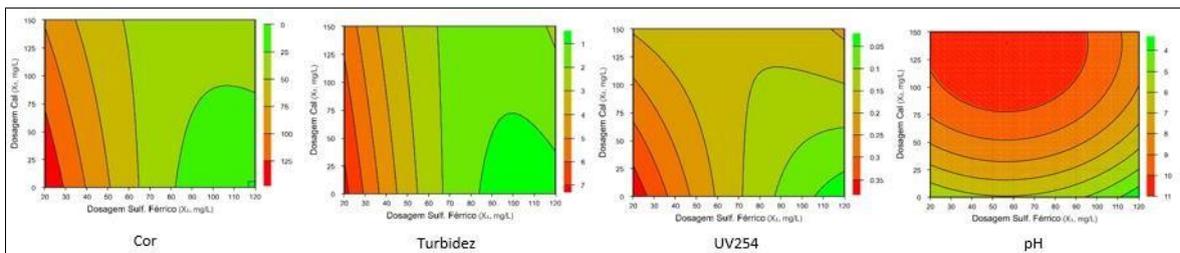


Figura 12 – Gráficos de superfície de resposta para o sulfato férrico.

Fonte: Autor (2023)

### Ensaio de tratabilidade – Sulfato de Alumínio

Os resultados experimentais com os valores residuais de cor, turbidez e UV 254, e o pH de coagulação referentes ao desempenho do sulfato de alumínio aplicado como coagulante da água de estudo são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de tratabilidade com Sulfato de Alumínio

Ensaio	Valores Codificados		Valores Reais (mg/L)		Resultados			
	Sulfato de Alumínio	Cal	Sulfato de Alumínio	Cal	Cor	Turbidez	pH	UV 254
1	-1	-1	40	22,4	139	6,40	7,27	0,23
2	1	-1	100	22,4	19	1,11	6,40	0,07
3	-1	1	40	128	231	29,40	10,62	0,29
4	1	1	100	128	149	8,00	10,27	0,25
5	-1,41	0	27,57	75,2	203	13,70	10,07	0,30
6	1,41	0	112,43	75,2	66	2,53	8,98	0,17
7	0	-1,41	70	0,53	25	1,29	6,38	0,08
8	0	1,41	70	149,87	170	20,90	10,59	0,26
9	0	0	70	75,2	199	14,50	9,89	0,31
10	0	0	70	75,2	203	14,70	9,87	0,32
11	0	0	70	75,2	204	14,10	9,89	0,32

Fonte: Autor (2023)

A análise estatística dos dados não demonstrou significância ao nível de 90% para o fator dosagem de alcalinizante quadrático relativa à variável turbidez. A variável UV 254 apresentou significância a todos os efeitos. Para as variáveis cor e pH o efeito da interação entre as dosagens de coagulante e alcalinizantes não foram significativos. A tabela 15 apresenta os dados brutos da análise de regressão para cada variável. Os efeitos padronizados considerados para os modelos ajustados, tabela 16, podem ser observados na figura 13 de (a) a (d).

Tabela 15 - Dados brutos da regressão para as variáveis respostas, Sulfato de Alumínio

Variável	Fatores	Média	Dosagem Coagulante		Dosagem Alcalinizante		$x_1 \cdot x_2$
			Linear $x_1$	Quadrático $x_1^2$	Linear $x_2$	Quadrático $x_2^2$	
Cor	Coefficiente	202	-49,47	-29,13	53,38	-47,63	9,5
	t calc	28,7	-11,48	-5,68	12,39	-9,28	1,56
	p-valor	0,000 0	0,0001	0,0024	0,0001	0,0002	0,1798
Turbidez	Coefficiente	14,43	-5,31	-2,75	7,2	-1,26	-4,03
	t calc	12,24	-7,35	-3,2	9,97	-1,47	-3,94
	p-valor	0,000 1	0,0007	0,0239	0,0002	0,2016	0,0109
pH	Coefficiente	9,88	-0,35	-0,27	1,65	-0,79	0,13
	t calc	55,25	-3,15	-2,07	15,03	-6,06	0,84
	p-valor	0,000 0	0,0254	0,0928	0,0000	0,0018	0,4397
UV 254	Coefficiente	0,32	-0,05	-0,04	0,06	-0,07	0,03
	t calc	76,23	-19,3	-12,99	24,29	-23,54	8,46
	p-valor	0,000 0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004

Fonte: Autor (2023)

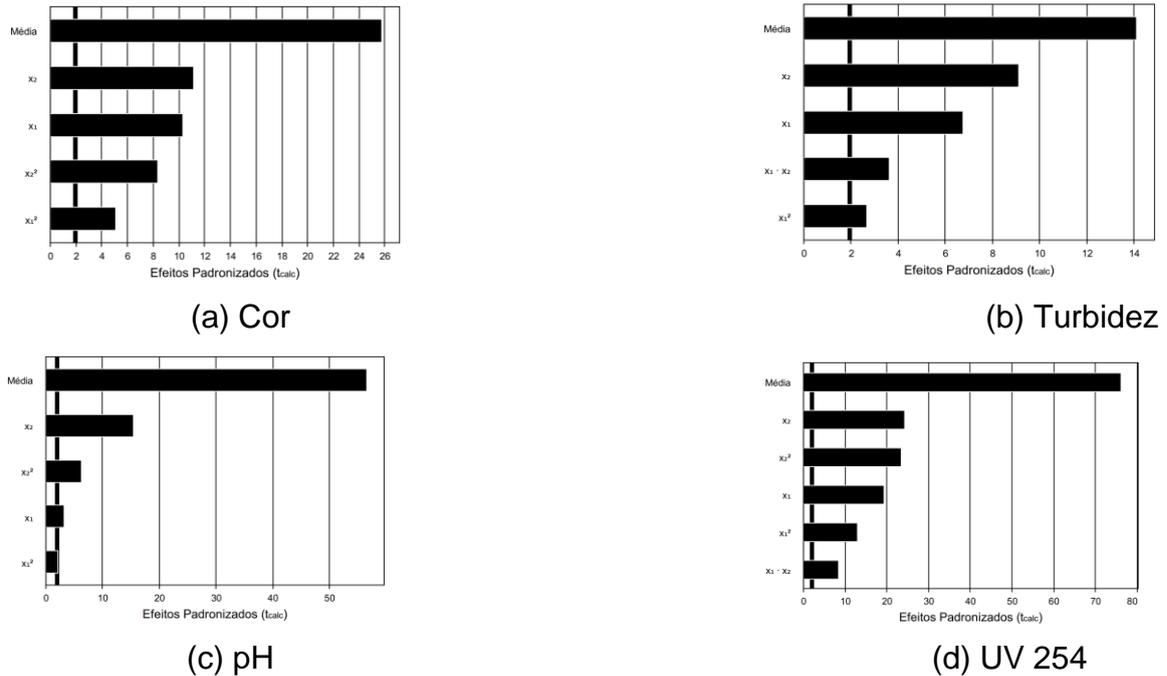


Figura 13 – Diagrama de Pareto para os efeitos padronizados, Sulfato de Alumínio

Tabela 16 – Modelos ajustados, Sulfato de Alumínio

Variáveis	Modelos
Cor	$Y_1 = 202 - 49,47 x_1 - 29,13 x_1^2 + 53,38 x_2 - 47,63 x_2^2$
Turbidez	$Y_2 = 13,24 - 5,31 x_1 - 2,38 x_1^2 + 7,20 x_2 - 4,03 x_1 x_2$
pH	$Y_3 = 9,88 - 0,35 x_1 - 0,27 x_1^2 + 1,65 x_2 - 0,79 x_2^2$
UV 254	$Y_4 = 0,32 - 0,05 x_1 - 0,04 x_1^2 + 0,06 x_2 - 0,07 x_2^2 + 0,03 x_1 x_2$

Fonte: Autor (2023)

A ANOVA do modelo quadrático indicou valores de  $F_{\text{regressão/resíduos}} \geq F_{\text{tab}}$  e  $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \leq F_{\text{tab}}$  para o modelo referente à variável parâmetros UV 254, demonstrando a significância estatística do modelo, conseqüentemente este possui bom ajuste ao processo. Já os modelos referentes às variáveis cor, turbidez e pH apresentaram  $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \geq F_{\text{tab}}$ , fato que pode acontecer quando o erro puro é muito baixo, nestes casos os valores obtidos para o erro puro foram, respectivamente, 14,0; 0,2 e 0,0. Entretanto todas obtiveram p-valor menor que 0,1000. Os coeficientes de regressão obtido pela ANOVA apresentaram  $R^2$  acima de 95%, conforme dados da tabela 17, indicando que os dados experimentais previstos foram bastantes satisfatórios.

Tabela 17 – Análise de Variância (ANOVA) para os parâmetros de resposta

	Cor	Turbidez	pH	UV-254
Freg/res / Ftab	76,9 / 3,18	37,2 / 3,18	71,7 / 3,18	325,7 / 3,45
p-valor	0,00003	0,00023	0,00003	0,00000
$F_{fa/ep} \leq F_{tab}$	38,9 / 9,24	79,5 / 9,24	1026,3 / 9,24	6,4 / 9,16
p-valor	0,02520	0,01245	0,00097	0,13892
R <sup>2</sup>	98,09%	96,12%	97,95%	99,69%

Fonte: Autor (2023)

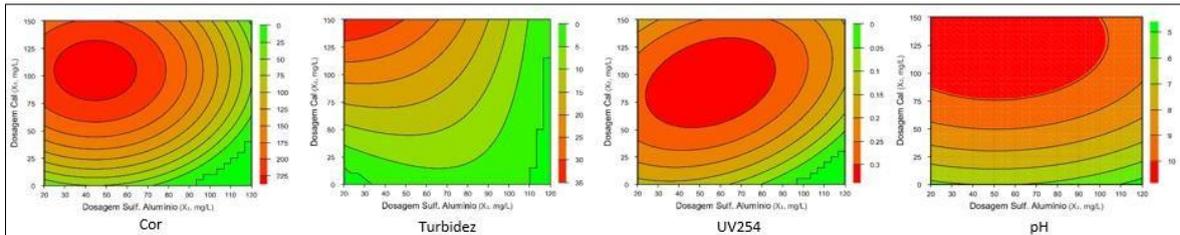


Figura 14 – Gráficos de superfície de resposta para o sulfato de alumínio.

Fonte: Autor (2023)

A figura 14 apresenta os gráficos de superfície de resposta obtidos para o modelo. Desta infere-se que residuais de cor e turbidez adequados para água decantada são obtidos a partir das dosagens mínimas de coagulante e de alcalinizante de 70 e 0,50 mg/L, respectivamente, referentes ao pH de coagulação de 6,02. Foram obtidos residuais abaixo de 1,5; 0,5 e 0,05 para os parâmetros cor, turbidez e UV254, respectivamente, na dosagem de sulfato férrico de 84 mg/L, 106 mg/L e 80 mg/L, respectivamente. Todas com 0,5 mg/L de alcalinizante.

### Validação dos modelos

A validação dos modelos propostos foi considerada nas dosagens de 80 mg/L de coagulante e 0,50 mg/L de alcalinizante. A tabela 18 traz os valores preditos, as médias obtidas após a realização de três ensaios nestas condições para cada coagulante e seus respectivos erros de ajuste. A observação dos dados concluiu que os valores previstos estão notavelmente próximos dos valores experimentais: portanto, todos os modelos são válidos.

Tabela 18 – Valores preditos e obtidos e condições ótimas de cada coagulante

Coagulante	Cor (mg/L)			Turbidez (uT)			pH			UV254 (m <sup>-1</sup> )		
	Predito	Obtido	Erro ajuste	Predito	Obtido	Erro ajuste	Predito	Obtido	Erro ajuste	Predito	Obtido	Erro Ajuste
PAC Ferroso	17,11	19	1,89	0,83	0,9	0,07	6,06	6,54	0,48	0,06	0,07	0,01
Sulfato Alumínio	11,42	12	0,58	2,92	3,05	0,13	5,82	6,02	0,2	0,05	0,06	0,01
Sulfato Férrico	27,53	29	1,47	1,18	1,25	0,07	5,61	5,94	0,33	0,12	0,11	-0,01

Fonte: Autor (2023)

### Desempenho dos coagulantes

Considerando os ensaios executados, apresentados nas tabelas 6, 10 e 14, percebe-se que os coagulantes sulfato férrico e sulfato de alumínio obtiveram as melhores remoções de cor, turbidez e UV254 com as dosagens de coagulantes e alcalinizante de, respectivamente 100 mg/L e 22,4 mg/L. Já o PAC ferroso apresentou melhor desempenho com 70mg/L de coagulante e 0,53 mg/L de alcalinizante. Todos os resultados foram obtidos em pH de coagulação que variou de 6,12 a 6,40.

Analisando os gráficos de superfície de resposta percebe-se que o desempenho dos coagulantes sulfato de alumínio e sulfato férrico na remoção de cor, turbidez e UV254 aumenta com o aumento da dosagem do coagulante e diminui com o aumento da dosagem de alcalinizante. O PAC ferroso tem comportamento similar para a dosagem do coagulante, entretanto sofre pouca variação com o aumento da dosagem de alcalinizante.

A maior eficiência para o sulfato de alumínio foi observada a partir de 80 mg/L de coagulante na região de pH entre 5,0 e 7,5. Lapointe *et al.* (2021) verificou que o desempenho do alumínio é significativamente reduzido em pH abaixo de 5,5, atribuindo este fato à redução das espécies monoméricas ( $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  e  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) e ao aumento simultâneo de espécies de  $\text{Al}^{3+}$  solúveis. Observações semelhantes foram relatadas por Manda *et al.* (2016). O PAC ferroso performou bem na mesma faixa de pH que a do sulfato de alumínio, porém com dosagem menor, a partir de 60 mg/L e menores residuais dos parâmetros estudados. Chiavola *et al.* (2023) constatou que em seu experimento, o PAC alcançou as maiores remoções de cor, turbidez e UV254 com menores dosagens, em comparação com sulfato de alumínio e cloreto férrico.

O sulfato férrico proporcionou valores de turbidez residual abaixo de 2,0 uT em ampla faixa de pH (5 a 10) e dosagens a partir de 67 mg/L. Bons resultados de cor e UV 254,

abaixo de 25 mg/l e 0,1 m<sup>-1</sup>, respectivamente, foram obtidos em pH de até 8 e dosagens maiores que 80 mg/L, resultados semelhantes aos obtidos por Dhrubo *et al.* (2023).

### Otimização Simultânea

De acordo com os dados da tabela 19, percebe-se que o PAC ferroso obteve os melhores resultados com as dosagens mais baixas de coagulante e alcalinizante. Os valores de desejabilidade globais ficaram próximo de 1 para as soluções dos três coagulantes.

Tabela 19 – Dados de otimização simultânea dos modelos

Variáveis		PAC Ferroso	Sulfato de Alumínio	Sulfato Férrico
Dosagem (mg/L)	Coagulante	78	105	105
	Alcalinizante	0,5	29	68
Cor (mg/L Pt-Co)	Predito	19,36	19,04	19,52
Turbidez (uT)	Predito	1,02	1,00	1,50
pH	Predito	8,29	7,03	8,14
UV254 (m <sup>-1</sup> )	Predito	0,07	0,12	0,07
Desejabilidade Global		0,9	1,0	0,7

Fonte: Autor (2023)

## 6 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados dos ensaios realizados para otimizar o processo de coagulação da água de estudo, proveniente de um manancial superficial, com a aplicação da metodologia de superfície de resposta e utilizando os coagulantes inorgânicos PAC ferroso e sulfatos férrico e de alumínio é possível concluir:

- o desempenho dos sulfatos na remoção de cor, turbidez e UV 254 é melhor com dosagens elevadas de coagulante e baixa dosagem de alcalinizante;
- a dosagem de alcalinizante tem pouca influência no desempenho do PAC ferroso, cuja performance melhora com o aumento de sua dosagem;
- os modelos matemáticos obtidos por meio da metodologia de superfície de resposta ajustaram-se bem ao processo de coagulação, obtendo precisões acima de 90%;
- as dosagens (mg/L) de coagulante e alcalinizante que otimizaram a coagulação da água de estudo para a máxima remoção de cor, turbidez, UV254, simultaneamente, foram: i) PAC ferroso: 78/0,5; ii) sulfato de alumínio: 105/29; iii) sulfato férrico: 105/68;
- o PAC ferroso obteve os melhores resultados de remoção para os parâmetros cor, turbidez e UV254 com as dosagens mais baixas de coagulante e alcalinizante, apresentando-se como o coagulante mais eficaz no processo de coagulação da água de estudo.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR n° 11176: Sulfato de alumínio, sulfato de alumínio isento de ferro – Aplicação em tratamento de água e efluentes - Especificação técnica, amostragem e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR n° 16911: Coagulantes à base de sais férricos — Cloreto férrico, clorossulfato férrico e sulfato férrico — Aplicação em saneamento básico — Especificação técnica, amostragem e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.
- ABDULLA, G. *et al.* Removal of iron from wastewater using a hybrid filter. **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** v. 888, 012035. 2020. DOI 10.1088/1757-899X/888/1/012035. Disponível em <https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012064>. Acesso em 5.02.2023.
- ALENAZI, M. *et al.* Turbidity removal using natural coagulants derived from the seeds of strychnos potatorum: statistical and experimental approach. **IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.** v. 888, 012064. 2020. DOI 10.1088/1757-899X/888/1/012064. Disponível em <https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012064>. Acesso em 5.02.2023.
- AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal American Water Works Association**, v. 74, n. 4, p. 210-216, apr. 1982. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1982.tb04890.x>
- AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R. Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 4. ed. New York: McGraw-Hill. 1990. p.269-365.
- ANDERSON, A. *et al.* Selective removal of natural organic matter during drinking water production changes the composition of disinfection by-products. **Environ. Sci. Water Res. Technol.** v. 6, p. 779-794, 2020. DOI 10.1039/c9ew00931k. Disponível em <https://doi.org/10.1039/c9ew00931k>. Acesso em 10.03.2023.
- BASTÜRK, E.; ALVER, A. Modeling azo dye removal by sono-fenton processes using response surface methodology and artificial neural network approaches. **Journal of Environmental Management**. v. 248, 109300, Oct. 2019. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.109300. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109300>. Acesso em 10.03.2023.
- BASTURK, I. *et al.* Medical laboratory wastewater treatment by electro-fenton process: Modeling and optimization using central composite design. **Water Environment Research**. v. 93, p. 393-408, Aug. 2020. DOI 10.1002/wer.1433. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wer.1433>. Acesso em 10.03.2023.
- BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria n° 518, de 25 de março de 2004.** Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância

da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021.** Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 15.07.2022.

BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater.** 3ªed. IWA Publishing, London - UK, 2016. 538 p.

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Treatment of an actual slaughterhouse wastewater by integration of biological and advanced oxidation processes: Modeling, optimization, and cost-effectiveness analysis, **Journal of Environmental Management.** v. 182, p. 651-666, Nov. 2016. DOI 10.1016/j.jenvman.2016.07.044. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.044>. Acesso em 10.03.2023.

CHAUKURA, N. *et al.* Contemporary issues on the occurrence and removal of disinfection byproducts in drinking water – areview. **J. Environ. Chem. Eng.** v. 8, 103659, 2020. DOI 10.1016/j.jece.2020.103659. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103659>. Acesso em 4.04.2023.

CHIAVOLA, A. *et al.* A combined experimental-modeling approach for turbidity removal optimization in a coagulation–flocculation unit of a drinking water treatment plant. **Journal of Process Control,** v. 130, 103068, Oct. 2023. DOI 10.1016/j.jprocont.2023.103068. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103068>. Acesso em: 5.10.2023.

CLEASBY, John L. *et al.* Design and operation guidelines for optimization of the high-rate filtration process: plant survey results. **AWWA Res. Fdn., Denver,** 1989.

DHRUBO, A. A. K.; JANNAT, M.; HOSSAIN, S. Enhancing the performance of coagulants for wastewater treatment by varying and optimizing the experimental parameters, **Journal of Water Process Engineering.** v. 55, 104144, Oct. 2023. DOI 10.1016/j.jwpe.2023.104144. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104144>. Acesso em 7.10.2023.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** 3ªed. Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2017. 1246 p.

EL-TAWEEL, R. M. *et al.* A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**. v. 6, 100358, 2023. DOI 10.1016/j.crgsc.2023.100358. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100358>. Acesso em 5.10.2023.

FERREIRA FILHO, S.S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2017. v. 1. 472 p.

FROTA, A. **Remoção de cor verdadeira em águas superficiais por meio das tecnologias de ciclo completo e filtração direta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins. Tocantins, 75p. 2022.

GODO-PLA, L. *et al.* Predicting the oxidant demand in full-scale drinking water treatment using an artificial neuralnetwork: uncertainty and sensitivity analysis. **Process Saf. Environ. Prot.** v.125, p. 317-327, Mar. 2019. DOI 10.1016/j.psep.2019.03.01. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.01>. Acesso em 4.04.2023.

GODO-PLA, L. *et al.* Control of primary disinfection in a drinking water treatment plant based on a fuzzy inference system. **Process Saf. Environ. Prot.** v.145, p. 63-70, Jul. 2020. DOI 10.1016/j.psep.2020.07.037. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.037>. Acesso em 4.04.2023.

HASHIM, K. S. *et al.* Iron removal, energy consumption and operating cost of electrocoagulation of drinking water using a new flow column reactor. **Journal of Environmental Management**, v. 189, p. 98-108. 2017.

HASHIM, K. S. *et al.* Effect of initial pH value on the removal of reactive black dye from water by electrocoagulation (EC) method. **J. Phys.: Conf. Ser.** 1294, Jul. 2017. DOI 10.1088/1742-6596/1294/7/072017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1294/7/072017>. Acesso em 5.02.2023.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEM, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. 1ªed. Editora Cengage Learning, São Paulo – SP, 2016. 620 p.

HUYSMAN, S. *et al.* Chemical and economic optimization of the coagulation-flocculation process for silver removal and recovery from industrial wastewater. **Separation and Purification Technology**. v. 179, p. 145–151, 2017. DOI 10.1016/j.seppur.2017.02.013 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.013>. Acesso em 10.03.2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de saneamento básico 2017**. Rio de Janeiro, 2020. 124 p.

JASSIM, N.; ALAMERI, M.; DAKHIL, S. Single objective optimization of surface water coagulation process using inorganic/organic aid formulation by taguchi method. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**. v. 8, n. 3, p. 1924-1934, Sep. 2020. DOI 10.21533/pen.v8i3.1616.g676. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v8i3.1616.g676>. Acesso em: 5.02.2023.

KAMIWADA, W. Y.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. Emprego do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. v. 25, n. 5, p. 667-676, Dez. 2020. DOI 10.1590/S1413-4152202020180005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180005>. Acesso em 16.06.2022.

KOUL, B. *et al.* Application of Natural Coagulants in Water Treatment: A Sustainable Alternative to Chemicals. **Water**. v. 14 , 3751, Nov. 2022. DOI 10.3390/w14223751. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14223751>. Acesso em 25.07.2023.

KOZIK, V. *et al.* Taguchi Method and Response Surface Methodology in the Treatment of Highly Contaminated Tannery Wastewater Using Commercial Potassium Ferrate. **Materials**. v. 12(22), 3784, Nov. 2019. DOI 10.3390/ma12223784. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12223784>. Acesso em 10.03.2023.

KURNIAWAN, S.B. *et al.* Challenges and Opportunities of Biocoagulant/Biofloculant Application for Drinking Water and Wastewater Treatment and Its Potential for Sludge Recovery. **Int. J. Environ. Res. Public Health**. v. 17, 9312, Dec. 2020. DOI 10.3390/ijerph17249312. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>. Acesso em 5.02.2023.

LAPOINTE, M. *et al.* Identifying the best coagulant for simultaneous water treatment objectives: Interactions of mononuclear and polynuclear aluminum species with different natural organic matter fractions, **Journal of Water Process Engineering**. v. 40, 101829, p. 2214-7144, Apr. 2021. DOI 10.1016/j.jwpe.2020.101829. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101829>. Acesso em 5.02.2023.

LEE, B.C.Y. *et al.* A comprehensive review of Design of experiment (DOE) for water and wastewater treatment application - Key concepts, methodology and contextualized application. **Journal of Water Process Engineering**. v. 47, 102673, Jun. 2022. DOI 10.1016/j.jwpe.2022.102673. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102673>. Acesso em 10.03.2023.

LI, W. *et al.* Determination of cost-effective optimum coagulant dosage for removal of disinfection by-product precursors in water treatment based on the theory of elasticity, **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, p. 102782, 102782, Jun. 2022. DOI 10.1016/j.jwpe.2022.102782. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102782>. Acesso em 5.02.2023.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4ªed. Editora Átomo, Campinas – SP, 2016. 640 p.

LIN, S. *et al.* Coagulant dosage determination using deep learning-based graph attention multivariate time series forecasting model. **Water Research**. v. 232,

e119665, Apr. 2023. DOI 10.1016/j.watres.2023.119665. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119665>. Acesso em: 25.07.2023

MACIEL, Paulo Marcos Faria e PAZ, Lyda Patrícia Sabogal. Diagrama de coagulação e otimização de misturas para água com turbidez elevada utilizando cloreto de polialumínio. 2017, **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 2017. Acesso em: 16 jun. 2022.

MAHTAB, M. S.; ISLAM, D. T.; FAROOQI, I. H. Optimization of the process variables for landfill leachate treatment using enton based advanced oxidation technique. **Engineering Science and Technology an International Journal**. v. 24, p.428-435, Apr. 2021. DOI 10.1016/j.jestch.2020.08.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.013>. Acesso em 10.03.2023.

MALIKA, M.; SONAWANE, S.S. MSG extraction using silicon carbide-based emulsion nanofluid membrane: Desirability and RSM optimisation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. v. 651, 129594, Oct. 2022. DOI 10.1016/j.colsurfa.2022.129594. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129594>. Acesso em 10.03.2023.

MANDA, I. K. M. *et al.* Comparative assessment of water treatment using polymeric and inorganic coagulants. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**. v. 93, p. 119-129, Jun. 2016. DOI 10.1016/j.pce.2015.09.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.09.008>. Acesso em 5.02.2023.

MANIMARAM, R. *et al.* A computational technique for prediction and optimization of VCR engine performance and emission parameters fuelled with Trichosanthes cucumerina biodiesel using RSM with desirability function approach. **Energy**. v. 254, 124293, Sep. 2022. DOI 10.1016/j.energy.2022.124293. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124293>. Acesso em 5.10.2023.

MENEZES, Maíra Correia de. **Investigação de processos operacionais de uma estação de tratamento de água de ciclo completo**. 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

ONU BR – NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL – ONU BR. A Agenda 2030. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>

PIMENTA, C. D. *et al.* Aplicação das metodologias Desirability e Simplex para otimização das propriedades mecânicas em arames de aço temperados.

**Production**. v. 25, n. 3, p. 598-610, jul./set. 2015. DOI 10.1590/0103-6513.094812. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.094812>. Acesso em 5.10.2023.

RIBEIRO, Lucas Cordeiro. **Características dos flocos formados com a utilização de Moringa oleifera como coagulante em água produzida com cor elevada**. 2021. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.420>.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 3. ed. Campinas: Cárita., 2014. 358 p.

ROSIŃSKA, A.; DĄBROWSKA, L. Influence of type and dose of coagulants on effectiveness of PAH removal in coagulation water treatment. **Water Science and Engineering**. v.14(3), p. 193-200, Sep. 2021. DOI 10.1016/j.wse.2021.08.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.08.004>. Acesso em 5.02.2023.

SAEED, M. O. *et al.* Application of CCD in RSM to obtain optimize treatment of POME using Fenton oxidation process. **Journal of Water Process Engineering**. v. 8, 2015, p. e7-e16, Dec. 2015. DOI 10.1016/j.jwpe.2014.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.11.001>. Acesso em 10.03.2023.

SAMARGHANDI, M. R. *et al.* Defluoridation of water using activated alumina in presence of natural organic matter via response surface methodology. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 887-897, Sep. 2016. DOI <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5293-x>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5293-x>. Acesso em 10.03.2023.

SHOKOOHI, R. *et al.* Study of the efficiency of moving bed biofilm reactor (MBBR) in LAS Anionic Detergent removal from hospital wastewater: determination of removing model according to response surface methodology (RSM). **Water Sci Technol**. v. 1, p. 1-7, Apr. 2017. DOI 10.2166/wst.2018.014. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2018.014>. Acesso em 10.03.2023.

SHOKRI, A. Application of Sono–photo-Fenton process for degradation of phenol derivatives in petrochemical wastewater using full factorial design of experimente. **Int. J. Ind. Química**. v. 9, p. 295–303, Oct. 2018. DOI 10.1007/s40090-018-0159-e. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0159-e>. Acesso em 10.03.2023.

SILVA, Kamila Jessie Sammarro e PAZ, Lyda Patrícia Sabogal. Tratabilidade de água de manancial superficial com Cloreto de Polialumínio (PAC): diagrama de coagulação e seleção de parâmetros operacionais. 2019, **Anais**. Rio de Janeiro: ABES, 2019. Acesso em: 16 jun. 2022.

SILVA, D. P. **Avaliação de estações de tratamento de água do tipo ciclo completo em função da ocorrência de cistos de Giardia e Oocistos de Cryptosporidium**. 2020. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

SRIVASTAVA, A. *et al.* Response surface methodology and artificial neural network modelling for the performance evaluation of pilot-scale hybrid nanofiltration (NF) & reverse osmosis (RO) membrane system for the treatment of brackish ground water. **Journal of Environmental Management**. v. 278, 111497, Jan. 2021. DOI 10.1016/j.jenvman.2020.111497. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111497>. Acesso em 10.03.2023.

SUQUET, J. *et al.* Assessing the effect of catchment characteristics to enhanced coagulation in drinking water treatment: RSM models and sensitivity analysis. **Science of The Total Environment**. v. 799, 149398, Dec. 2021. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.149398. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149398>. Acesso em 5.02.2023.

TANG, Y. *et al.* An enhanced coagulation using a starch-based coagulant assisted by polysilicic acid in treating simulated and real surface water. **Chemosphere**. v. 259, 127464, Nov. 2020. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.127464. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127464>. Acesso em 10.03.2023.

USEFI, S.; ASADI-GHALHARI, M. Modeling and Optimization of the Coagulation-Flocculation Process in Turbidity Removal from Aqueous Solutions Using Rice Starch. **Pollution**, v. 5(3), p. 623-636, Jul. 2019. DOI: 10.22059/poll.2019.271649.552. Disponível em <https://doi.org/10.22059/poll.2019.271649.552>. Acesso em 5.02.2023.

VARANK, G. *et al.* Statistical optimization of process parameters for tannery wastewater treatment by electrocoagulation and electro-Fenton techniques. **Desalination and Water Treatment**. v. 57, p. 25460–25473, Mar. 2016. DOI 10.1080/19443994.2016.1157042. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1157042>. Acesso em 10.03.2023.

WILLIAMS, C. J. *et al.* Selective removal of dissolved organic matter affects the production and speciation of disinfection byproducts. **Science of The Total Environment**. v. 652, 2019, p. 75-84, Feb. 2019. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.10.184. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.184>. Acesso em 10.03.2023.

WANG, H. *et al.* Design of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-PAM composite flocculant with self-degrading characteristics and optimization of the flocculation process using a combination of central composite design and response surface methodology. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. v. 583, 123982, Dec. 2019. DOI 10.1016/j.colsurfa.2019.123982. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123982>. Acesso em 5.02.2023.

WANG, Y. *et al.* Optimization of coagulation–flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. v. 20, p. 391-396, Mar. 2014. DOI 10.1016/j.jiec.2013.04.033. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.04.033>. Acesso em 10.03.2023.

WEISSMAN, S.A.; ANDERSON, N.G. Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. **Org. Processo. Res. Dev.** v. 19, n. 11, p. 1605–1633, Jun. 2014. DOI 10.1021/op500169m. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/op500169m>. Acesso em 10.03.2023.

WESTPHALEN, A. P. C.; CORÇÃO, G.; BENETTI, A. D. Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 21 (03), Jul-Sep. 2016. DOI 10.1590/S1413-41522016143108. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016143108>. Acesso em 4.4.2023.

ZHOU, L.; ZHOU, H.; YANG, X. Preparation and performance of a novel starch-based inorganic/organic composite coagulant for textile wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**. v. 210, p. 93-99, Feb. 2019. DOI 10.1016/j.seppur.2018.07.089 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.089>. Acesso em 5.02.2023.

ZUBAIDI S. L. *et al.* The Prediction of Municipal Water Demand in Iraq: A Case Study of Baghdad Governorate. **Developments in eSystems Engineering (DeSE)** (Kazan, Russia) p. 274-277. 2019.