

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AMBIENTAL – PPGCTA

Vanessa Rossato De Bastiani

**SÍNTESE E EFICIÊNCIA DA QUITOSANA CATIONICA NO
TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA**

Frederico Westphalen, RS
2023

Vanessa Rossato De Bastiani

SÍNTESE E EFICIÊNCIA DA QUITOSANA CATIÔNICA NO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Arci Dirceu Wastowski

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Jaqueline Ineu Golombieski

Frederico Westphalen, RS
2023

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

De Bastiani, Vanessa Rossato
SÍNTESE E EFICIÊNCIA DA QUITOSANA CATIONICA NO
TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA / Vanessa Rossato De
Bastiani.- 2023.
101 p.; 30 cm

Orientador: Arci Dirceu Wastowski
Coorientadora: Jaqueline Ineu Golombieski
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós
Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, RS, 2023

1. Aplicação. 2. Flocculante orgânico. 3. Modificação
estrutural. 4. Polissacarídeos cationicos. 5. Quitosana.
I. Wastowski, Arci Dirceu II. Golombieski, Jaqueline
Ineu III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, VANESSA ROSSATO DE BASTIANI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Vanessa Rossato De Bastiani

**SÍNTESE E EFICIÊNCIA DA QUITOSANA CATIÔNICA NO
TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestra em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Aprovada em 26 de setembro de 2023:

Arci Dirceu Wastowski, Dr. (UFSM)
(Presidente / Orientador)

Jefferson Alves da Costa Júnior, Dr. (UFSM)

Sandro Rogério Giacomelli, Dr. (URI)

Genesio Mario da Rosa, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS
2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Nicolli Dalmolin, minha filha,
fonte radiante de luz e inspiração!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, *Campus* de Frederico Westphalen - UFSM-FW, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, juntamente com seus professores, secretários e técnicos administrativos que contribuíram e auxiliaram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Doutor Arci Dirceu Wastowski pela oportunidade de realizar este estudo, do qual ele é idealizador e orientador. O professor Arci, me proporcionou desafios que não pensei ser capaz de solucionar, porém me surpreendi com aprendizado que adquiri durante estes dois anos. Agradeço imensamente por isso.

À Dra. Micheli Pokulat Sauer, servidora da UFSM-FW, por todo apoio prestado nas atividades realizadas em laboratório, pelas dúvidas sanadas, por dividir conhecimento sem medidas e principalmente por ter aturado meus surtos nos momentos mais desafiadores da pesquisa em laboratório.

Aos colegas do Laboratório do Grupo de Pesquisa Gerenciamento Ambiental e Manejo de Recursos Hídricos (GAMRH) que deixaram as incertezas da pesquisa mais leves e fáceis de lidar.

À minha irmã do coração Lidiane Lohrentz que mesmo longe foi minha conselheira, amiga e principalmente a pessoa que me manteve centrada nos meus objetivos pessoais e profissionais. Obrigada por tudo e tanto!

Agradeço aos meus pais Antonio Carlos De Bastiani e Zilda Rossato De Bastiani por todos os seus esforços, pois mesmo com as dificuldades da vida batalharam, lutaram e apoiaram meus objetivos. Juntamente com meu irmão Iarle, são a melhor família que eu poderia ter!

Ao Daniel Sartori Dalmolin por estar presente em todos os momentos, ser meu companheiro, me entender nos momentos difíceis e ser meu incentivador. Não existem palavras para agradecer tudo o que você fez/faz por mim e por nós, por ora, obrigada!

Por fim, a todos contribuíram com este trabalho, meu muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERS).

RESUMO

SÍNTESE E EFICIÊNCIA DA QUITOSANA CATIÔNICA NO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA

AUTORA: Vanessa Rossato De Bastiani
ORIENTADOR: Prof. Dr. Arci Dirceu Wastowski

A água destinada ao consumo humano deve cumprir os padrões de potabilidade estabelecidos por regulamentos legais, a fim de garantir isso muitas vezes se faz necessário realizar uma série de etapas de tratamento. Estes procedimentos geralmente envolvem a aplicação de agentes químicos, como o sulfato de alumínio, no entanto, a presença residual desses produtos na água pode induzir impactos adversos no meio ambiente e na saúde humana. Uma alternativa para abordar essa problemática é a adoção de polímeros orgânicos catiônicos como substitutos dos agentes químicos convencionais. A quitosana, um polímero orgânico, derivado da quitina, e desempenha um papel relevante nesse contexto. No entanto, em certas circunstâncias, é necessário efetuar modificações na estrutura da quitosana para viabilizar a sua utilização como um polissacarídeo catiônico. Um dos reagentes mais empregados para essa finalidade é o cloreto de 3-cloro-2-hidroxi-propiltrimetilamônio (CHPTAC). Nesse contexto, esta pesquisa teve por objetivo a produção de um polissacarídeo catiônico derivado da quitosana por meio do processo de cationização em diferentes meios aquosos, fazendo uso do reagente CHPTAC. O produto final foi então aplicado no tratamento de água, variando as dosagens e o pH. O sistema de tratamento foi simulado através do uso do equipamento conhecido como "Jar Test," seguido de filtração com papel filtro. A pesquisa revelou que a cationização da quitosana resultou em grau de substituição de 1,39, 1,03 e 0,80, respectivamente em QCSA, QCSB e QCSN. As quitosanas sintetizadas obtiveram eficiência de remoção de até 97,9% para turbidez e 97,2% para cor. Enquanto que a quitosana não adulterada (QP) alcançou um percentual de remoção de 98,5% da turbidez e 99,1% da cor. Entre as dosagens avaliadas, aquelas frequentemente mencionadas com os maiores percentuais de remoção foram de 15 mg/L, contudo, dosagens mais elevadas também demonstraram resultados satisfatórios para QP. Com relação às faixas de pH testadas, cada floculante analisado mostrou melhor desempenho em uma faixa de pH específica, sendo que o pH ácido foi o mais frequente. O estudo evidenciou a eficácia da quitosana, tanto na forma catiônica quanto não catiônica, no processo de tratamento físico-químico da água, desempenhando um papel significativo na redução de cor e turbidez. Esses resultados destacam que o uso de agentes floculantes orgânicos são uma alternativa viável à substituição dos coagulantes inorgânicos amplamente empregados.

Palavras-chave: Aplicação. Floculante orgânico. Modificação estrutural. Polissacarídeos catiônicos. Quitosa.

ABSTRACT

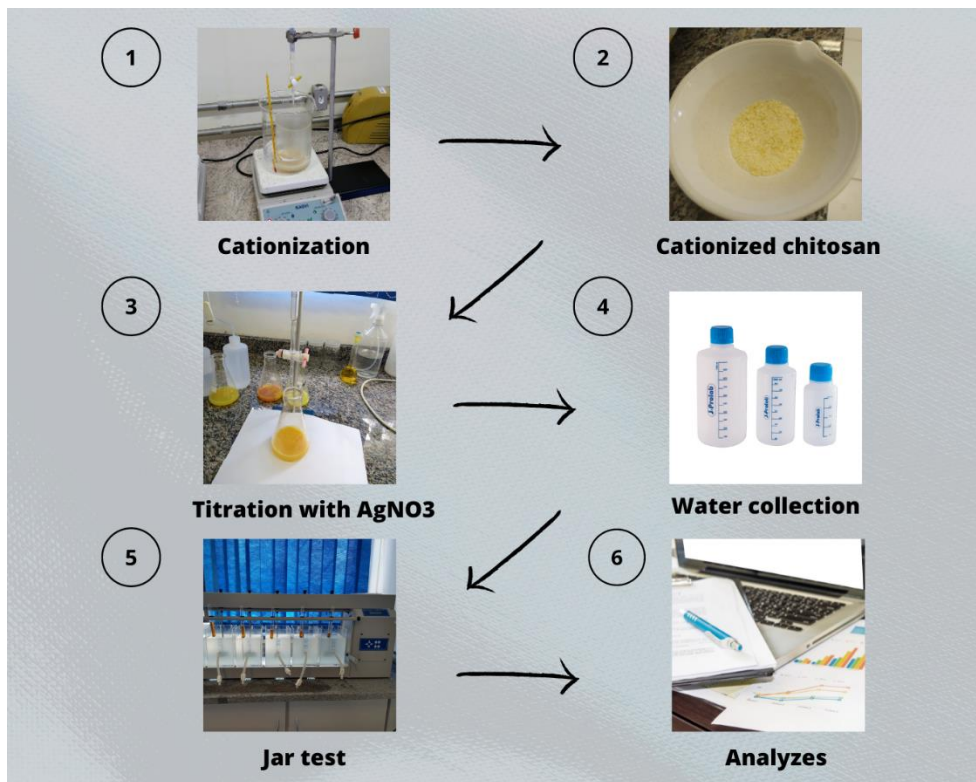
SYNTHESIS AND EFFICIENCY OF CATIONIC CHITOSAN IN THE PHYSICAL-CHEMICAL TREATMENT OF WATER

AUTHOR: Vanessa Rossato De Bastiani
ADVISOR: Prof. Dr. Arci Dirceu Wastowski

Water intended for human consumption must meet the potability standards established by legal regulations. To ensure this, it is often necessary to carry out a series of treatment steps. These procedures typically involve the application of chemical agents, such as aluminum sulfate. However, the residual presence of these products in the water can lead to adverse impacts on the environment and human health. An alternative to address this issue is the adoption of cationic organic polymers as substitutes for conventional chemical agents. Chitosan, an organic polymer derived from chitin, plays a significant role in this context. However, under certain circumstances, modifications to the chitosan structure are required to enable its use as a cationic polysaccharide. One of the most commonly employed reagents for this purpose is 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride (CHPTAC). In this context, this research aimed to produce a cationic polysaccharide derived from chitosan through the cationization process in different aqueous media using the CHPTAC reagent. The final product was then applied in water treatment, with variations in dosages and pH. The treatment system was simulated using equipment known as the "Jar Test," followed by filtration with filter paper. The research revealed that the cationization of chitosan resulted in a degree of substitution of 1.39, 1.03, and 0.80, respectively, in QCSA, QCSB, and QCSN. The synthesized chitosans achieved removal efficiencies of up to 97.9% for turbidity and 97.2% for color. Unaltered chitosan (QP) achieved a removal percentage of 98.5% for turbidity and 99.1% for color. Among the evaluated dosages, those frequently mentioned with the highest removal percentages were 15 mg/L; however, higher dosages also demonstrated satisfactory results, especially for QP. Regarding the tested pH ranges, each flocculant analyzed exhibited better performance within a specific pH range, with acidic pH being the most frequent. The study demonstrated the effectiveness of chitosan, both in cationic and non-cationic forms, in the physicochemical water treatment process, playing a significant role in reducing color and turbidity. These results highlight that the use of organic flocculants is a viable alternative to replace widely employed inorganic coagulants.

Keywords: Application. Organic flocculant. Structural modification. Cationic polysaccharides. Chitosan.

RESUMO GRÁFICO



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da estrutura molecular da quitosana.....	19
Figura 2 - Estrutura molecular da quitina.	23
Figura 3 - Estrutura molecular da quitosana.	24
Figura 4 - Cloreto de 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamónio (CHPTAC).....	29
Figura 5 - Mecanismo de reação geral da quitosana com CHPTAC (QUAB 188).....	31
Figura 6 - Posições dos sítios reacionais de substituição do grupo amino e das hidroxilas nos carbonos C2, C3 e C6 na unidade de anidroglicose.	34
Figura 7 - Simulação de tratamento da água com coagulante a base de quitosana no aparelho Jar test.....	65
Figura 8 - Diagrama de coagulação para turbidez em água tratada com QCSA, QCSB, QCSN e QP.....	67
Figura 9 – Diagrama de coagulação para cor após ensaio de coagulação com QCSA, QCSB, QCSN e QP.....	71
Figura 10 – Diagrama de coagulação para turbidez após ensaio de coagulação com Tanfloc SG 1% e Tanfloc SG 2%.	75
Figura 11 – Diagrama de coagulação para cor após ensaio de coagulação com Tanfloc SG 1% e Tanfloc SG 2%.....	77
Figura 12 – Diagrama de coagulação para turbidez após ensaio de coagulação com sulfato de alumínio.	78
Figura 13 – Diagrama de coagulação para cor após ensaio de coagulação com sulfato de alumínio.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Revisão das técnicas de enxerto na molécula da quitosana.....	28
Tabela 2 – Padrão organoléptico de potabilidade para alguns parâmetros.	43
Tabela 3 – Métodos e equipamentos utilizados nas análises de pH, cor, turbidez, alcalinidade e temperatura.	58
Tabela 4 – Valor máximo permitido para parâmetros de cor e turbidez	60
Tabela 5 – Valores do grau de substituição (DS), cationização com CHPTAC.....	62
Tabela 6 - Resultado do coagulante QP: turbidez (uT), pH e percentual de redução em relação a turbidez inicial.....	69
Tabela 7 - Remanescente de cor com o floculante a base de QP.	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros operacionais nos ensaios de coagulação	59
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AgNO ₃	Nitrato de prata
CHPTAC	Cloreto de 3-cloro-2-hidroxiopropiltrimetilamônio
DD	Grau de desacetilação, do inglês: degree of deacetylation
DS	Grau de substituição, do inglês: degree of substitution
EDAC	Cloridrato de N-(3-Dimetilaminopropil)-N'-etilcarbodiimida
EPTAC	Cloreto de 2,3-epoxipropiltrimetilamônio
GTMAC	Cloreto de glicidil trimetil amônio
HTCC	Cloreto de N-(2-hidroxil)-propil-3-trimetiamônio quitosana, do inglês: hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride chitosan
K ₂ CrO ₄	Cromato de potássio
LETA	Lodo de estação de tratamento de água
Mo	Peso molar médio
NaBH ₄	Borohidreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NHS	N- Hidroxissuccinimida
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
P.M	Peso molecular
QCSA	Quitosana cationizada em solução ácida
QCSB	Quitosana cationizada em solução básica
QCSN	Quitosana cationizada em solução neutra
QP	Quitosana não adulterada, quitosana pura
QUAB 151	Cloreto de 2,3-epoxipropiltrimetilamônio
QUAB 188	Cloreto de 3-cloro-2-hidroxiopropiltrimetilamônio
S.A	Sulfato de alumínio
uC	Unidade de cor
uT	Unidade de turbidez

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo geral	20
1.1.2 Objetivos específicos	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 POLÍMEROS NATURAIS	21
2.2 QUITINA	23
2.3 QUITOSANA	24
2.3.1 Aplicações da quitosana	26
2.4 MODIFICAÇÃO DA ESTRUTURA QUÍMICA DA QUITOSANA	27
2.5 SÍNTESE DA QUITOSANA COM CHPTAC	29
2.5.1 Mecanismos de reação da quitosana com CHPTAC	30
2.5.2 Grau de substituição (DS) da quitosana	33
2.6 QUITOSANA CATIÔNICA COMO COAGULANTE/FLOCULANTE	35
2.7 TRATAMENTO DE ÁGUA	37
2.7.1 Processo de coagulação e floculação	38
2.7.1.1 Mecanismos de coagulação	38
2.7.1.1.1 <i>Compressão da camada difusa</i>	39
2.7.1.1.2 <i>Adsorção-neutralização</i>	39
2.7.1.1.3 <i>Varredura</i>	40
2.7.1.1.4 <i>Adsorção e formação de pontes interpartículas</i>	40
2.8 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS NATURAIS E TRATADAS	41
2.8.1 Turbidez	43
2.8.2 Cor	45
2.8.3 Temperatura	46
2.8.4 Alcalinidade	46
2.8.5 pH	47
3 MATERIAS E MÉTODOS	49
3.1 REAGENTES E MATÉRIAS-PRIMAS	49
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE QUITOSANA CATIÔNICA	50
3.2.1 Cálculo da massa molar da quitosana	50

3.2.2 Técnica de cationização da quitosana	51
3.2.2.1 Cationização em solução neutra	51
3.2.2.2 Cationização em solução básica	52
3.2.2.3 Cationização em solução ácida	53
3.2.3 Análise do grau de substituição	53
3.2.3.1 Titulação com nitrato de prata (AgNO_3)	53
3.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO	54
3.3.1 Floculantes e coagulantes	55
3.3.1.1 Quitosanas (QP, QCSA, QCSB e QCSN)	55
3.3.1.2 Tanfloc	56
3.3.1.3 Sulfato de alumínio	56
3.2.2 Coleta de água bruta	56
3.2.3 Preparo água sintética	57
3.2.4 Parâmetros de controle	57
3.2.5 Dosagens dos coagulantes	58
3.2.6 Procedimentos utilizados nos ensaios em Jar-test	59
3.2.7 Eficiência de remoção	60
3.2.8 Diagramas de coagulação	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE QUITOSANA CATIONIZADA	62
4.1.1 Grau de substituição	62
4.2. ENSAIOS DE COAGULAÇÃO	65
4.2.1 Jar test	65
5. CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO ÁCIDA (QCSA)	88
APÊNDICE B – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO BÁSICA (QCSB)	89
APÊNDICE C – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO NEUTRA (QCSN)	90
APÊNDICE D – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA NÃO ADULTERADA (QP)	91

APÊNDICE E – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 1%.....	92
APÊNDICE F – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 2%.....	93
APÊNDICE G – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM SULFATO DE ALUMÍNIO.....	94
APÊNDICE H – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO ÁCIDA (QCSA).....	95
APÊNDICE I – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO BÁSICA (QCSB).....	96
APÊNDICE J – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO NEUTRA (QCSN)	97
APÊNDICE K – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA NÃO ADULTERADA (QP).....	98
APÊNDICE L – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 1%.....	99
APÊNDICE M – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 2%.....	100
APÊNDICE N – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM SULFATO DE ALUMÍNIO.....	101

1 INTRODUÇÃO

A água é de vital importância para a manutenção da vida no planeta, sendo que, a sua disponibilidade está diretamente conexa com a história dos seres vivos. Relaciona-se com a viabilidade e disposição de recursos, sejam eles animais, vegetais ou minerais, além de favorecer ou inviabilizar a existência das mais variadas espécies (BACCI; PATACA, 2008).

Entretanto, a intensificação das ações antrópicas juntamente com as mudanças climáticas intensas, tem provocado alterações consideráveis na disposição de água, o que intensifica alguns dos principais problemas da contemporaneidade, como o desenvolvimento social e econômico das cidades, além dos prejuízos ocasionados pelos impactos ambientais (GUO et al., 2019; ZHANG et al., 2016).

Com relação a água destinada à utilização humana, tanto no consumo e preparo de alimentos quanto para a higiene, a água deve estar de acordo com as normas elaboradas pelas agências reguladoras e atender os padrões de potabilidade exigidos. No Brasil a Portaria GM/MS Nº 888/2021, estabelece os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água, assim como o seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

A água, utilizada para o abastecimento humano necessita, geralmente, passar por uma série de tratamentos para atingir os padrões de potabilidade exigidos na Portaria GM/MS Nº 888/2021. O tratamento da água, de modo geral, consiste na remoção de toda e qualquer partícula suspensa e/ou coloidal, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias possivelmente insalubres à saúde humana presentes nas águas (BOTERO et al., 2009; FRANCISCO; POHLMANN; FERREIRA, 2009; LIBÂNIO, 2010).

Desta forma, o tratamento da água sofre grande influência e está diretamente vinculado a qualidade da água bruta. O tratamento convencional da água é o mais empregado no Brasil e compreende as seguintes operações: coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração, desinfecção e correção de pH, em alguns casos também é utilizado a fluoretação (BOTERO et al., 2009; HUANG et al., 2016).

A coagulação/floculação são processos extremamente importantes no tratamento físico-químico da água. Nestes ocorrem a desestabilização das impurezas/coloides presentes na água e com isso são produzidos aglomerados de

flocos, os quais são removidos nas etapas subsequentes do tratamento (GAO; HAHN; HOFFMANN, 2002; WANG et al., 2016; YANG et al., 2019).

Comumente, nos processos de coagulação/floculação são utilizados coagulantes inorgânicos como o sulfato de alumínio e outros sais metálicos (GAO; HAHN; HOFFMANN, 2002; SILVEIRA et al., 2019). Quando esses grupos entram em contato com a água, desencadeiam reações de hidrólise. Conseqüentemente, ocorre a geração de cargas positivas, que têm o efeito de diminuir o potencial zeta do ambiente aquoso. Isso, por sua vez, viabiliza a eliminação das partículas em suspensão na água (FARIAS; FERREIRA, 2014).

A utilização de coagulantes inorgânicos pode ser justificada devido ao baixo custo e alta eficiência (SILVEIRA et al., 2019). Entretanto, o tratamento convencional da água acaba gerando alguns impactos ambientais, entre eles, a geração de um resíduo rico em matéria orgânica, micro e macronutrientes e metais potencialmente tóxicos. O resíduo gerado ao final deste processo é denominado lodo de estação de tratamento de água (LETA) (BOTERO et al., 2009).

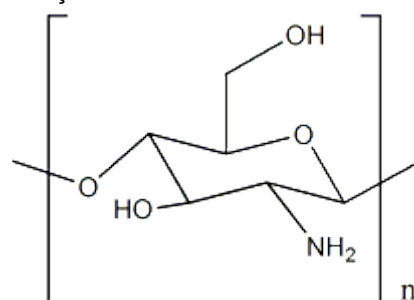
Além disso, os coagulantes/floculantes sintéticos possuem outras desvantagens, tais como: a presença dos sais de ferro e alumínio que são agentes inorgânicos não biodegradáveis que acrescentam elementos químicos à água e/ou ao lodo, e ocasionam a dependência de recursos não renováveis (NOOR et al., 2019). Ademais, íons como o alumínio residual são conhecidos por sua toxicidade e têm sido associados a danos cerebrais e ao desenvolvimento de doenças, como o Alzheimer (MICHELAN, et al. 2021).

Diversas alternativas econômicas e tecnicamente viáveis, além de ambientalmente vantajosas para o destino do resíduo e/ou substituição dos materiais têm sido propostas. Uma alternativa que tem ganhado espaço nos últimos anos é a substituição dos coagulantes inorgânicos por coagulantes orgânicos de origem vegetal e animal, principalmente os de origem vegetal (BOTERO et al., 2009).

Os coagulantes orgânicos são desenvolvidos a base de polímeros naturais, os quais apresentam vantagens devido a sua ampla disponibilidade, menor custo, baixa toxicidade, biodegradabilidade e vida útil curta, respeitando assim o meio ambiente (HUANG et al., 2016; IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015; LEE; ROBINSON; CHONG, 2014; LIN et al., 2019; LU et al., 2014).

Dentre os polímeros naturais utilizados como flocculantes pode-se citar a quitosana, Figura 1, a qual apresenta alto desempenho na floculação e também possui propriedades antimicrobianas (HUANG et al., 2016; IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015; STRAND et al., 2001). A quitosana é derivada da quitina, que atualmente é considerada o segundo polímero orgânico mais abundante do mundo, atrás apenas da celulose (IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015).

Figura 1 - Representação da estrutura molecular da quitosana.



Fonte: Adaptado de LI et al. (2004).

A molécula da quitosana possui a presença de grupos amino que possibilitam a sua protonação, garantindo certa solubilidade em soluções aquosas (IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015). Assim, com o intuito de melhorar o desempenho das propriedades da quitosana, torna-se necessária a realização de modificações químicas em sua estrutura. Ao longo dos anos tem-se elaborado diferentes técnicas de cationização que podem ser empregadas na quitosana. Ao se fazer uso destas técnicas aumenta-se a carga elétrica positiva das moléculas em comparação com a quitosana não sintetizada e mantém-se a sua biodegradabilidade e demais características (LU et al., 2014).

Um dos reagentes utilizados para produção de catiônicos orgânicos, bem como à preparação da quitosana sintetizada, é o cloreto de 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamônio (CHPTAC), ele aumenta o teor catiônico do flocculante e, assim, melhora sua eficiência de floculação durante o tratamento da água (MOMENI et al., 2018).

Com base no exposto, esta pesquisa teve por objetivo transformar a quitosana em diferentes polímeros catiônicos por meio do processo de cationização em meios aquosos distintos, além de caracterizar o grau de substituição nos monômeros da

quitosana para cada um dos processos e avaliar as propriedades dos produtos obtidos como agentes de floculação no tratamento de água com turbidez elevada (100-180 NTU).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de floculantes a base de quitosana, em comparação com floculantes convencionais, sulfato de alumínio e Tanfloc SG, para utilização no tratamento físico-químico da água com turbidez elevada.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral deste trabalho, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- I. Submeter a quitosana a modificações químicas em diferentes meios aquosos, empregando o reagente cloreto de 3-cloro-2-hidroxi-propiltrimetilamônio (CHPTAC), e determinar o grau de substituição dos produtos resultantes;
- II. Realizar ensaios de simulação de tratamento de água, em escala laboratorial, englobando as etapas de coagulação, floculação e sedimentação, empregando o dispositivo conhecido como Jar Test;
- III. Identificar o intervalo de pH mais propício para a aplicação das quitosanas sintetizadas, bem como da quitosana não adulterada;
- IV. Desenvolver diagramas de coagulação, com faixas de pH e dosagem de coagulante, para remoção de cor e turbidez;
- V. Comparar a capacidade de floculação das quitosanas sintetizadas e da quitosana não adulterada com os floculantes a base de sulfato de alumínio e **Tanfloc SG (1% e 2%)**.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, serão abordados assuntos que serviram para o embasamento teórico deste trabalho. Foram relatadas as características fundamentais dos polímeros naturais, com destaque para a quitosana, principal derivado da quitina. Tendo em vista que a quitosana é o elemento essencial deste trabalho revisou-se os conhecimentos publicados referentes a quitosana não adulterada e a quitosana catiônica, com potencial para atuarem como coagulante/floculante orgânico no tratamento de águas com turbidez elevada. Também foram abordados aspectos físico-químicos do tratamento da água, com destaque para as fases de coagulação/floculação, além de serem apresentados os parâmetros físico-químicos de qualidade da água.

Inicia-se esta revisão com a caracterização dos polímeros orgânicos, bem como da quitosana, formas de obtenção, técnicas de cationização e uso industrial do produto estudado.

2.1 POLÍMEROS NATURAIS

Os polímeros são macromoléculas constituídas pela repetição de monômeros que apresentam alto peso molecular. Podem ser de origem orgânica ou inorgânica, sendo os orgânicos especialmente versáteis, de baixo custo e facilmente obtidos (SILVA; RABELO, 2017).

De acordo com a ABNT NBR 15448-1 (2008), os polímeros orgânicos são produzidos a partir de fontes renováveis, como por exemplo milho e cana-de-açúcar. Dentre os biopolímeros com maior destaque estão: celulose, quitina, amido, quitosana, taninos, entre outras (HABITZREUTER et al., 2022; VERÍSSIMO, 2018; SILVA; RABELO, 2017).

Os polímeros naturais, também são conhecidos como biopolímeros, e têm se destacado como uma alternativa promissora para substituir os polímeros sintéticos e/ou convencionais, produzidos a partir de derivados do petróleo, e que estão presentes em uma infinidade de produtos disponibilizados pelas indústrias (STRAND et al., 2001).

Os biopolímeros, além de sua ampla disponibilidade e origem renovável, têm proporcionado o desenvolvimento de novos materiais utilizados em várias áreas e aplicações. Dentre as suas características estruturais, propriedades físico-químicas e atividades biológicas, destacando-se a biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa toxicidade, fatos que os tornam especialmente úteis (HABITZREUTER et al., 2022).

Esses polímeros naturais têm sido amplamente utilizados em processos tecnológicos, com destaque, aos que envolvem a separação ou estabilização de sistemas dispersos, como no tratamento de água potável e em águas residuais (STRAND et al., 2001).

O estudo envolvendo polímeros orgânicos para a produção de flocculantes tem se intensificado ao longo dos anos. Estes são susceptíveis a modificações que otimizam o processo de floculação, surgindo assim os chamados polieletrólitos catiônicos (VERÍSSIMO, 2018).

Os polímeros usados no tratamento da água, especialmente na coagulação/floculação, apresentam diversas vantagens, sendo a resistência dos flocos às forças de cisalhamento a mais significativa. Além disso, os polieletrólitos catiônicos neutralizam as impurezas em aglomerados de massas maiores, potencializando assim a sedimentação (RABIEE; ERSHAD-LANGROUDI; ZEYNALI, 2015). Com isso, contribuem para a melhoria da qualidade da água tratada, beneficiam o meio ambiente, a saúde dos consumidores e facilitam a disposição final do lodo gerado durante o tratamento (RITTER, 2013).

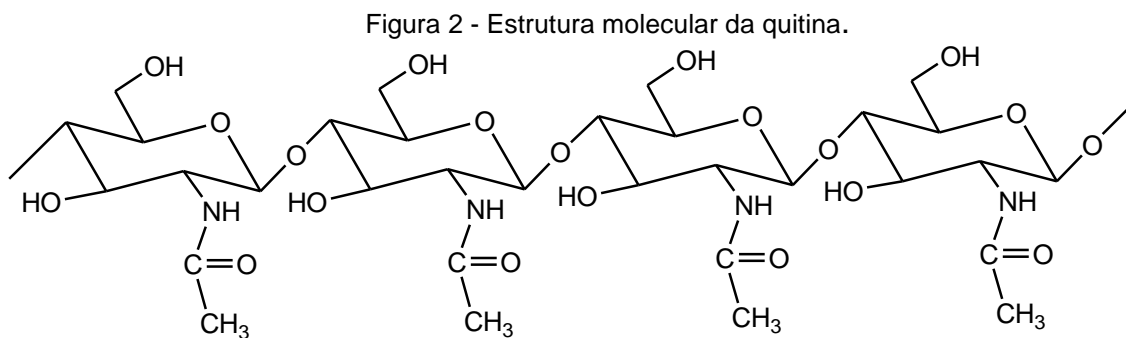
Conforme Habitzreuter et al. (2022) os biopolímeros estudados para os processos de floculação/coagulação possuem grupos em suas cadeias que permitem e facilitam a interação com íons metálicos, auxiliando assim na remoção dos mais variados poluentes.

Diante de fatores ambientalmente favoráveis, o desenvolvimento de polímeros naturais e/ou biodegradáveis, apresentam inúmeras vantagens e é ecologicamente correto, uma vez que se enquadra perfeitamente no conceito de sustentabilidade, reduzindo os impactos negativos associados ao uso de polímeros inorgânicos (SILVA; RABELO, 2017).

2.2 QUITINA

A quitina é um polímero orgânico, o segundo mais abundante do planeta, atrás somente da celulose (IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015; YOUNES; RINAUDO, 2015). Pode ser encontrada no exoesqueleto de crustáceos, nas cutículas de insetos, algas e na parede celular de leveduras (ARANAZ, 2021; IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015; KIM et al., 2022; YOUNES; RINAUDO, 2015). A obtenção comercial da quitina é principalmente a partir das cascas de crustáceos, disponíveis em grandes quantidades no processamento da indústria pesqueira (SPINELLI, 2001).

A quitina é caracterizada como um polímero linear que possui uma estrutura química heterogênea composta por unidades de 2-acetamido-2-desoxi- β -D-glucosamina unidas por ligações glicosídicas do tipo β -(1 \rightarrow 4), bem como 2-amino-2-desoxi- β -D-glucosamina distribuídas aleatoriamente, conforme a Figura 2, (ARANAZ, 2021; IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015; SONG et al., 2018; SPINELLI, 2001).



Fonte: SPINELLI (2001).

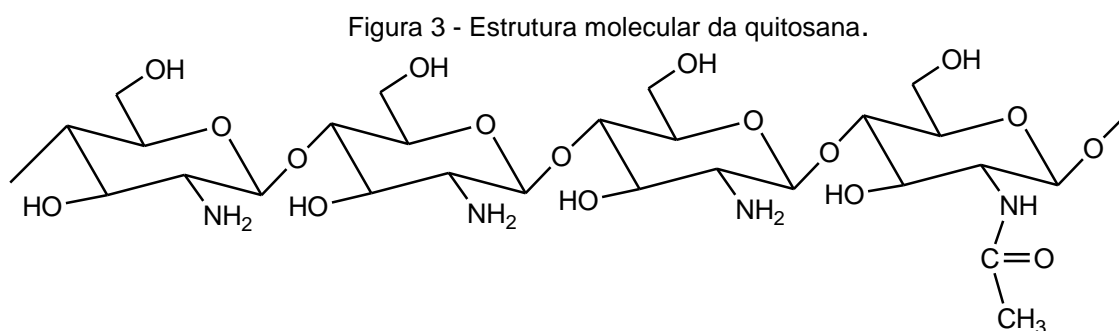
Devido a quitina ser um material biodegradável, biocompatível, de baixa toxicidade e capaz de interagir com diversas substâncias, o desenvolvimento de novas aplicações para este biopolímero é economicamente muito atrativo, além de ser uma alternativa promissora aos materiais sintéticos, com potencial para aplicações sustentáveis em diversas áreas (YOUNES; RINAUDO, 2015).

2.3 QUITOSANA

O derivado mais importante da quitina é a quitosana. Esta é obtida por meio de técnicas distintas, dentre elas, duas merecem destaque, sendo: a desacetilação parcial da quitina em condições alcalinas e a hidrólise enzimática (PONTIUS, 2016; SONG et al., 2018).

O desenvolvimento de tais métodos torna-se necessário pois apesar da quitina ser amplamente detectada, a quitosana só é encontrada na natureza em pequenas quantidades, especificamente em alguns fungos (ARANAZ, 2021; IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015). Desta forma, a quitosana comercializada, e que foi adquirida para este estudo, é produzida, principalmente, através da desacetilação química dos grupamentos de quitina encontrados na carapaça dos crustáceos (ARANAZ et al., 2021).

Ambas, quitina e quitosana, são construídas por uma família de polissacarídeos lineares compostos por quantidades variadas de D-glucosamina, constituinte do grupamento amina, e de N-acetil-D-glucosamina, que é a unidade acetilada da molécula, unidas por ligações glicosídicas do tipo β -(1 \rightarrow 4) (ARANAZ et al., 2021). Observa-se que na quitina, a predominância ocorre nas unidades acetiladas, enquanto na quitosana, as unidades desacetiladas são as proeminentes (conforme ilustrado na Figura 3) (WANG et al., 1991).



Fonte: SPINELLI (2001).

De acordo com Strand et al. (2001), o termo quitosana refere-se a toda família de heteropolissacarídeos lineares solúveis em ácidos que são compostos por

quantidades variáveis de 2-acetamido-2-desoxi- β -D-glucosamina e 2-amino-2-desoxi- β -D-glucosamina.

A descrição a cima vai de encontro a Younes e Rinaudo (2015), que descrevem a quitosana como um copolímero aleatório, no qual, o grau de acetilação é caracterizado pela fração molar de unidades N-acetiladas, fato que é variável a cada processo de desacetilação, pois cada processo resulta em um produto único, embora se utilize da mesma técnica.

A quitina origina um novo produto, porém as propriedades físico-químicas se mantêm diretamente relacionadas com as características do material original, isso inclui: o seu grau de desacetilação, a massa molar e o pH do meio (ARANAZ, 2021; WANG et al., 1991). Além disso, essas características se relacionam com a futura aplicabilidade do biopolímero (PANDA et al., 2022).

Devido a similaridade entre as duas moléculas, Alves (2008) relata que os principais parâmetros que diferenciam a quitosana são o grau médio de desacetilação (DD), ou seja, o número de grupos amino em relação aos grupos acetamido da cadeia molecular, e a solubilidade da molécula.

Segundo Kim et al. (2022), o grau de N-acetilação ou desacetilação da quitina é variável, estando na faixa de 90% ou mais. Enquanto que, para outros autores, o material é considerado quitosana quando o grau de desacetilação da quitina for superior a 50% (ARANAZ, 2021; IBRAHIM; EL-ZAIRY, 2015; RINAUDO; PAVLOV; DESBRIÈRES, 1999).

Além destas definições, há formas mais simples de caracterização do biopolímero estudado, tal qual a descrição de Song et al. (2018) que consideram o produto como quitosana quando a quitina é N-desacetilada e se tornar solúvel em meio ácido diluído.

Os oligômeros de quitosana podem ser solúveis em uma ampla faixa de pH, porém quitosanas com peso molecular muito elevado são solúveis somente em meio aquoso ácido, mesmo com bons índices de desacetilação (ARANAZ, 2021). A quitosana possui baixa solubilidade em água e é insolúvel em meio alcalino, além de apresentar alto peso molecular (DIVAKARAN; PILLAI, 2004; GRUŠKIENE; DEVEIKYTE; MAKUŠKA, 2013).

Como exposto, há uma certa divergência quanto a solubilidade da quitosana, isto provavelmente se deve aos vários fatores que podem influenciar na solubilidade

do produto estudado, dentre eles: a temperatura, o pH, o peso molecular, o grau de acetilação e a cristalinidade do polímero (ARANAZ, 2021). Song et al. (2018) chegaram a descrever que a solubilidade da quitosana em meio aquoso é pH dependente.

Uma boa opção para superar a barreira que a solubilidade impõe à quitosana é através de modificações químicas nos grupos funcionais do esqueleto da quitosana, hidroxila e amino. Com isso, é possível ampliar a sua aplicabilidade através de novos derivados, além de aprimorar propriedades como hidrossolubilidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade e atividades antibacteriana e antifúngica (MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018).

2.3.1 Aplicações da quitosana

A quitosana, derivada da desacetilação da quitina, é um polissacarídeo alcalino único, que além de ser biocompatível e facilmente biodegradável no meio ambiente, apresenta propriedades biológicas e físico-químicas que possibilitam a sua aplicabilidade em múltiplas áreas (ARANAZ, 2021).

A quitosana pode ser utilizada em diversas extensões, dentre elas: biomedicina, engenharia de tecidos, farmacologia, cosméticos, biotecnologia, indústria de couro e celulose, indústria têxtil, revelações fotográficas, tratamento de água e efluentes (adsorção de metais pesados e corantes), indústria alimentícia, agricultura, como antibacteriana e antifúngica, dentre outras (ARANAZ, 2021; ARANAZ; HARRIS; HERAS, 2010; LARANJEIRA; FÁVERE, 2009; MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018; MUÑOZ et al., 2023; YOUNES; RINAUDO, 2015).

Devido as suas características, a quitosana, especialmente a que passou por um processo de modificação em sua estrutura molecular, revela uma enorme versatilidade de aplicação em áreas completamente distintas, sendo a engenharia hídrica a área de interesse deste trabalho. A seguir, será abordado sobre as formas de modificação da estrutura química da quitosana, as quais são desenvolvidas com o intuito de potencializar o seu desempenho.

2.4 MODIFICAÇÃO DA ESTRUTURA QUÍMICA DA QUITOSANA

No intuito de melhorar as propriedades da quitosana incluindo a solubilidade, degradabilidade e o potencial de ação, novos derivados têm sido produzidos, através de diferentes técnicas, dentre elas: a desacetilação, acetilação, alquilação, N-fosfometilação, carboxilação, sulfonação, amidação, copolimerização de enxerto, despolimerização e cationização (quaternização), a qual será abordada neste trabalho (ARANAZ, 2021; ARANAZ; HARRIS; HERAS, 2010; MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018; MUÑOZ et al., 2023; YU; KECEN; XIAOSAI, 2018).

As reações químicas desenvolvidas com a quitosana não devem afetar suas propriedades básicas, uma vez que esta precisa manter sua biodegradabilidade, suas propriedades antimicrobianas (antifúngicas) e não apresentar toxicidade. Desta forma, ao realizar as modificações, aprimora-se as características físico-químicas, mecânicas e térmicas da quitosana (MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018).

A quitosana geralmente passa por um processo de cationização e/ou modificação estrutural, pois apresenta baixa solubilidade em meio alcalino e neutro (GRUŠKIENE; DEVEIKYTE; MAKUŠKA, 2013). A cationização é uma técnica que visa introduzir cargas positivas ao longo da cadeia polimérica das moléculas, desta forma, induzindo um efeito catiônico de caráter polieletrólito, independentemente do pH do meio aquoso (ARANAZ; HARRIS; HERAS, 2010).

Na quitosana, a cationização geralmente ocorre através de reações de N-substituição, ou seja, há substituição no grupamento NH_2 , este é mais reativo que os grupamentos OH^- . A substituição dos grupamentos, NH_2 e/ou OH^- , melhora as características hidrofílicas da quitosana (MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018). Porém, o tipo e o grau de substituição da modificação podem afetar a atividade hidrossolúvel da quitosana (SONG et al., 2018).

Em contra ponto, algumas pesquisas indicaram que a quitosana quaternária modificada apresenta boa solubilidade em soluções aquosas ácidas, neutras e básicas (LU et al., 2014). Na Tabela 1, são apresentados alguns agentes modificadores da quitosana e as características do meio no qual as reações foram realizadas.

Tabela 1 - Revisão das técnicas de enxerto na molécula da quitosana.

Referência	Agente modificador	Características da solução
Panda et al. (2022)	Ácido fumárico.	Quitosana dispersa em água deionizada, mantida em pH 7 com a adição de bicarbonato de sódio.
Song et al. (2018)	CHPTAC.	Quitosana dispersa em uma solução de LiOH/KOH/ureia/H ₂ O.
Lu et al. (2014)	GTMAC.	Quitosana dispersa em isopropanol.
Kim et al. (2022)	CHPTAC.	Quitosana dispersa em ácido acético, mantida em pH 8 com a adição de NaOH.
Peng et al. (2010)	GTMAC.	Quitosana dispersa em água destilada.
Lim e Hudson (2004)	GTMAC.	Quitosana dispersa em água destilada.
Seong, Whang e Ko (2000)	GTMAC.	Quitosana dispersa em água destilada.
Momeni et al. (2018)	CHPTAC.	Quitosana dispersa em água destilada e NaOH.
Alves (2008)	Borohidreto de sódio (NaBH ₄) dissolvido em água destilada.	Quitosana dispersa em ácido acético.
Lin et al. (2019)	Cloridrato de N-(3-Dimetilaminopropil)-N'-etilcarbodiimida (EDAC) e N-Hidroxissuccinimida (NHS).	Quitosana dispersa em ácido acético, mantida em pH 5-6 com a adição de NaOH.
Gruškiene, Deveikyte e Makuška (2013)	GTMAC.	Quitosana dispersa em NaOH; ácido acético e água deionizada.

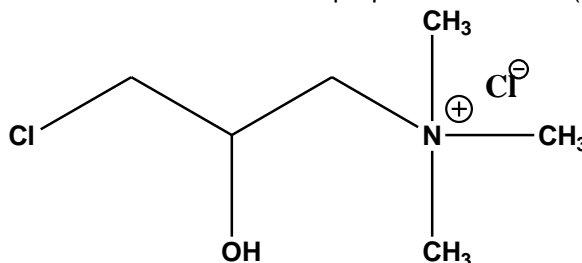
Fonte: Autora (2023).

2.5 SÍNTESE DA QUITOSANA COM CHPTAC

Em pesquisas realizadas nos últimos anos, comumente tem-se utilizado o grupo 2-hidroxi-3-trimetilamônio-propil com a finalidade de eterificação e cationização de polissacarídeos. O qual, pode ser obtido a partir da reação do polissacarídeo com o cloreto de 2,3-epoxipropiltrimetilamônio (EPTAC), este é caracterizado por ser um reagente instável, tóxico e caro, fato que favorece a utilização do reagente gerado in situ, no caso, o cloreto de 3-cloro-2-hidroxi-propiltrimetilamônio (CHPTAC), o qual também é comercializado (PRADO; MATULEWICZ, 2014).

O CHPTAC é um composto de amônio quaternário, ou seja, em sua estrutura possui quatro grupos orgânicos ligados a um átomo de nitrogênio, sendo três deles grupos metila (-CH₃) e um grupo cloreto Cl⁻, Figura 4. O grupamento catiônico, trimetilamônio (-N(CH₃)₃⁺) e o ânion Cl⁻, que atua como um contra íon formador de sal, permitem a solubilidade dos biopolímeros em água (NEENAZ, 2015).

Figura 4 - Cloreto de 3-cloro-2-hidroxi-propiltrimetilamônio (CHPTAC).



Fonte: Adaptado de HUANG; ZHAO; YE (2016); LI et al. (2004); LIM; HUDSON (2004) & SPINELLI; LARANJEIRA; FÁVERE (2004).

Ao ser realizada a cationização com CHPTAC, eleva-se a carga elétrica positiva dos biopolímeros, em especial da quitosana, e com isto melhora-se a solubilidade nas soluções aquosas em geral, ampliando assim o seu potencial de uso (LU et al., 2014).

A cationização visa a introdução de sais de amônio quaternário na coluna dorsal da molécula de quitosana elevando a sua solubilidade para todas as faixas de pH (LIM; HUDSON, 2004). Derivados de quitosana com uma porção de amônio quaternário são de interesse, resultando em uma carga catiônica permanente no esqueleto do polissacarídeo. Além disso, a baixa solubilidade em água da quitosana

pode ser melhorada pela ligação de uma porção de amônio quaternário (SONG et al., 2018).

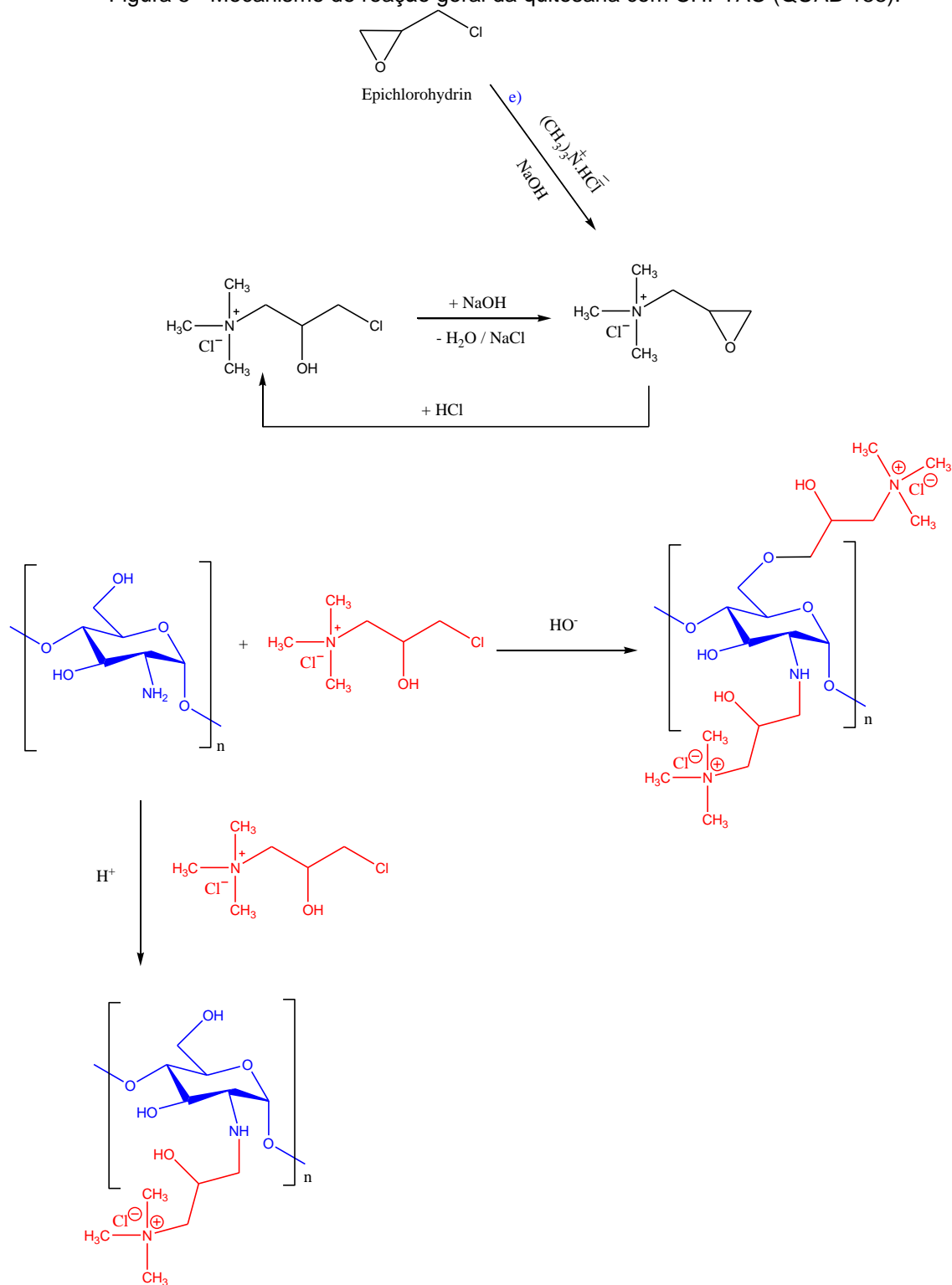
O CHPTAC foi escolhido devido a sua facilidade de reação com os grupamentos da quitosana, em especial com o grupo amino, e por garantir a solubilidade do produto final em água numa ampla faixa de pH (LIM; HUDSON, 2004), fato que, vai de acordo com os objetivos iniciais propostos pelo trabalho.

2.5.1 Mecanismos de reação da quitosana com CHPTAC

A quitosana possui uma molécula com grupamentos distintos, grupo hidroxila (-OH) e grupo amino (-NH₂), que podem sofrer modificações e evoluir para diversos derivados (MU et al., 2016). Estes grupamentos ocorrem em grande número e com isso é possível realizar modificações que visam melhorar as propriedades físicas e químicas da molécula de quitosana, além de expandir os seus campos de aplicação (ALVES, 2008; MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018).

A modificação química que ocorre na quitosana é por substituição, N-substituição se o grupo amino (-NH₂) for substituído e O-substituição se o grupamento hidroxila (-OH) reagir com o agente modificador (MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018). A representação esquemática da reação geral da quitosana com CHPTAC pode ser conferida na Figura 5.

Figura 5 - Mecanismo de reação geral da quitosana com CHPTAC (QUAB 188).



Fonte: Adaptado de HUANG; ZHAO; YE (2016); LI et al. (2004); LIM; HUDSON (2004) & SPINELLI; LARANJEIRA; FÁVERE (2004).

As reações de cationização, geralmente, começam com a formação de um alcóxido em um dos grupos hidroxila do polissacarídeo em solução aquosa de NaOH

(ou outra base), este alcóxido ataca o epóxido adicionado ou formado in situ pelo meio alcalino, e abre o epóxido para formar o hidroxietér (PRADO; MATULEWICZ, 2014).

Exposto que vai de acordo com Song et al., (2018), os quais relatam que o CHPTAC é usado como reagente de eterificação, resultando em um hidroxietér, na qual inicialmente, em condições alcalinas, forma epóxido e reage com o alcóxido de sódio da quitosana.

Nas reações realizadas em soluções neutra e ácida o CHPTAC reage principalmente com os grupamentos amino da molécula de quitosana, devido as suas propriedades nucleofílicas ocorre o rompimento do anel epóxido do CHPTAC. (GRUŠKIENE; DEVEIKYTE; MAKUŠKA, 2013). Em meio ácido, ocorre a protonação dos grupos amino, fazendo com que apresente uma significativa densidade de cargas positivas (VISENTINI; RODRIGO; RHODEN, 2020).

Em condições alcalinas o CHPTAC pode reagir com grupos hidroxila e é usado para a quaternização de amido. Entretanto, a preparação de derivados de quitosana exclusivamente O-quaternizados é complicada devido à insolubilidade da quitosana em meio alcalino. Além disso, a síntese de quitosanas O-quaternizadas requer proteção de grupos amino mais ativos (GRUŠKIENE; DEVEIKYTE; MAKUŠKA, 2013). Não foram encontradas publicações sobre a quaternização da quitosana direta e exclusivamente através de grupos hidroxila que envolvam a proteção dos grupos aminos mais ativos.

Especificamente em condição aquosa neutra, os grupos hidroxilas da quitosana não são nucleofílicos o suficiente para induzir a abertura do anel epóxido do CHPTAC, enquanto que o grupo amino é nucleofílico suficiente para abri-lo (LIM; HUDSON, 2004).

A reação de substituição do grupo hidroxila é rara de acontecer, pois o grupo -OH é menos reativo que o grupo amino (MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018). Além disso, a preparação de derivados de quitosana O-quaternizados é complicada devido à baixa solubilidade da quitosana em meio alcalino (ARANAZ, 2021). Porém quando ocorre, o CHPTAC atua como um reagente de eterificação e forma epóxido que reage com o alcóxido de sódio da quitosana (SEONG; WHANG; KO, 2000).

A quitosana é insolúvel em água devido à natureza da sua molécula, constituída por pontes de hidrogênio, a introdução de grupos de amônio quaternário faz com que

haja a desestabilização destas ligações aumentando a capacidade de hidratação da molécula (PENG et al., 2010). Após a cationização com CHPTAC a quitosana tornara-se solúvel em água, como descrito nos trabalhos de: Lim e Hudson (2004) e Peng et al. (2010).

Almejando a utilização da quitosana como coagulante, Momeni et al. (2018) destacam que a enxertia do composto, CHPTAC, nas moléculas de quitosana aumenta o teor catiônico e, assim, melhora a eficiência durante o tratamento da água, especificamente no processo de floculação.

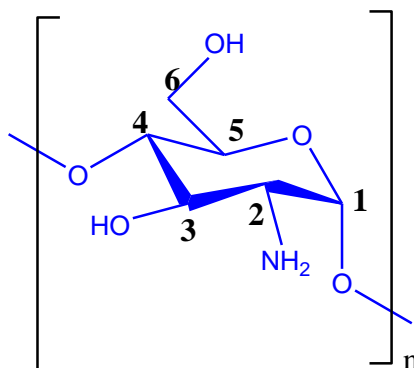
Além disso, Noor et al. (2019) relatam que a reação ocasionada pela adição de CHPTAC em polímeros naturais e sintéticos resulta em polímeros catiônicos reativos através da adição de um grupo de amônio quaternário ao produto, proporcionando o aumento da polaridade, higroscopicidade e afinidade por materiais aniônicos.

2.5.2 Grau de substituição (DS) da quitosana

O grau de substituição, refere-se, dentre os sítios ativos de uma molécula, ao número de substituições que podem ocorrer em seus radicais, resultando em um polímero modificado. No caso deste estudo, o CHPTAC contém um átomo de nitrogênio e um de cloro em seu grupo amônio quaternário, em caso de sucesso da reação de cationização, o aumento no teor de cloreto poderá confirmar o enxerto de CHPTAC na cadeia principal dos monômeros de quitosana.

As modificações químicas na quitosana são baseadas na reatividade dos grupos substituintes da sua estrutura, nos carbonos 2, 3 e 6. A reatividade desses grupos, ligados aos carbonos do anel, obedece à seguinte ordem decrescente C2, C6 e C3, referentes, respectivamente, ao grupo amino da quitosana, ao grupo hidroxila primário e ao grupo hidroxila secundário, este último requer um agente desprotonante para se tornar disponível à reação (ALVES, 2008). A Figura 6 indica as posições dos sítios reacionais na molécula da quitosana.

Figura 6 - Posições dos sítios reacionais de substituição do grupo amino e das hidroxilas nos carbonos C2, C3 e C6 na unidade de anidroglicose.



Fonte: Autora, 2023.

O grau de substituição da quitosana é um parâmetro importante que mede a quantidade de grupos funcionais presente na estrutura da quitosana que foram substituídos por outros grupos químicos, como os grupos de amônio quaternários introduzidos pelo cloreto de 3-cloro-2-hidroxiopropiltrimetilamônio (CHPTAC) durante o processo de modificação catiônica. Segundo Lim e Hudson (2004), o DS pode ser definido como a razão de mol que reagiu com o CHPTAC por mol de glucosamina calculado a partir da massa original de quitosana utilizada.

O CHPTAC possui o contra íon cloreto que o acompanha de maneira a manter a neutralidade elétrica da molécula, possibilitando desta forma, que o teor de cloreto na quitosana cationizada também possa indicar o grau de substituição na molécula. Lu et al. (2014) utilizaram o método argentométrico a fim de identificar a presença de cloreto na molécula de quitosana após reação com GTMAC, no estudo os resultados demonstraram o enxerto, contudo, foi apoiado com análise complementar de espectroscopia de Raio x.

A determinação do grau de substituição da quitosana catiônica é fundamental para compreender suas propriedades e aplicabilidades, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado à carga positiva, solubilidade e capacidade de interação com substratos aniônicos. A classificação da eficiência da quitosana, após o processo de cationização, depende diretamente do grau de substituição alcançado (ARANAZ; HARRIS; HERAS, 2010).

A quitosana catiônica possui relatos de sucesso em seu desempenho associado ao aumento do DS após a derivatização. Autores como: Peng et al. (2010), Song et al. (2018), Lin et al. (2019), Mao et al. (2021) e Seong, Whang e Ko (2000),

obtiveram uma variação considerável no valor final do DS, respectivamente: 6%, 18% e 44%; 16,5% a 46,8%; 6%; 0,165, 0,199 e 0,182; e 1,04, porém em todos constatou-se que houve o enxerto do agente modificador na molécula de quitosana, o que elevou o potencial de uso do material em questão.

Portanto, a determinação do grau de substituição é um passo crucial na caracterização da quitosana catiônica, pois fornece informações valiosas sobre suas propriedades químicas e possibilita a otimização da síntese e utilização deste polímero.

2.6 QUITOSANA CATIÔNICA COMO COAGULANTE/FLOCULANTE

A quitosana é classificada como um polieletrólito. Por definição, polieletrólitos são macromoléculas que apresentam grupos ionizáveis na extensão de toda a sua cadeia. Tais grupos ionizáveis, dependendo da funcionalidade, podem ser classificados como aniônicos ou catiônicos (FELIPE et al., 2017).

Os polieletrólitos catiônicos podem ser aplicados no tratamento de água, tanto como coagulante primário, quanto como coadjuvante de coagulante, pois são carregados positivamente. A quitosana catiônica, pode ser utilizada como floculante, pois é um polímero de alto peso molecular contendo cargas positivas que são usadas como agentes de clarificação, sedimentação, filtração e/ou centrifugação (RABIEE; ERSHAD-LANGROUDI; ZEYNALI, 2015).

A quitosana, um dos floculantes naturais mais conhecidos, se decompõe no meio ambiente, mas tem baixa solubilidade em água e deve primeiro ser dissolvida em ácidos diluídos e/ou passar por processo de cationização antes de ser utilizada na floculação (HOU et al., 2018). Com a cationização o grupo amino multi carregado, positivamente na posição C2 da quitosana, pode interagir com compostos carregados negativamente e macromoléculas (SONG et al., 2018).

Materiais à base de quitosana têm sido sugeridos como coagulantes e floculantes potencialmente ecológicos para tratamento de água e efluentes devido às suas características biológicas naturais, biodegradabilidade e não toxicidade (ALVES, 2008; PONTIUS, 2016; VISENTINI; RODRIGO; RHODEN, 2020).

Nos últimos anos o mercado da quitosana teve um aumento considerável de uso, devido as grandes possibilidades de utilização, uma dessas utilizações é o uso no tratamento físico-químico da água (ARANAZ, 2021). Segundo Ibrahim e El-Zairy (2015), a quitosana possui propriedades quelantes naturais que a tornam eficiente no tratamento de águas residuais, pois permitem a ligação e remoção de íons metálicos. Em outras palavras, a natureza catiônica das quitosanas as tornam especialmente interessantes para a floculação de partículas carregadas negativamente (STRAND et al., 2001).

As propriedades de coagulação e floculação da quitosana dependem da fonte de quitina/quitosana. Sendo que, o controle de qualidade e as propriedades da quitosana no mercado não são uniformes entre os fabricantes. Considerando que o controle de qualidade, as características do produto e as práticas de transporte para coagulantes inorgânicos (alumínio e férrico) estão bem estabelecidos (PONTIUS, 2016).

É preferível usar polímeros orgânicos que sais metálicos, visto que os polímeros orgânicos são usados em menor dosagem. Os floculantes orgânicos biodegradáveis não resultam em acúmulo residual, não afetam a qualidade da água produzida e são economicamente melhores que outros coagulantes, pois o uso de polímeros orgânicos leva a uma maior densidade efetiva (densificação do floco) e assim melhora a velocidade de sedimentação (ABDO et al., 2020).

Momeni et al. (2018), utilizaram quitosana catiônica, sintetizada com CHPTAC, para o tratamento de água residual visando a remoção do corante de melanoidina, na qual constataram que o coagulante apresenta eficácia na remoção de cor e na turbidez, tornando-se eficiente para a remoção do corante, evidenciando que o coagulante a base de quitosana mostra-se adequado para o tratamento de águas residuais.

Em estudo de Visentini; Rodrigo e Rhoden (2020), a quitosana foi comparada com o sulfato de alumínio no tratamento da água, os autores constataram que a quitosana apresentou resultados melhores em turbidez elevada ao serem avaliadas as mesmas condições. Com relação a remoção de cor, os resultados do sulfato de alumínio foram melhores, entretanto os valores obtidos como o tratamento à base de quitosana se enquadravam nos padrões vigentes.

Visando a utilização da quitosana no tratamento da água tornasse necessário compreender melhor os processos envolvidos, bem como os parâmetros que são analisados na água disponibilizada para o consumo humano, os quais serão discutidos nos próximos itens deste trabalho.

2.7 TRATAMENTO DE ÁGUA

A fim de assegurar a qualidade da água fornecida à população, é imprescindível realizar um tratamento que garanta sua purificação antes do consumo. Em linhas gerais, o tratamento visa produzir água potável de maneira segura para o consumo humano, considerando aspectos como o odor, sabor e aparência da água (ABDO et al., 2020).

Deste modo, o tratamento da água propõe a remoção de toda e qualquer partícula suspensa e/ou coloidal, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias insalubres à saúde humana que podem estar presentes na água bruta (BOTERO et al., 2009; FRANCISCO; POHLMANN; FERREIRA, 2009; LIBÂNIO, 2010).

A escolha do tratamento mais indicado é pautada em algumas condições, com destaque para: as características da água bruta (principalmente a turbidez); custos de implantação, manutenção e operação; manuseio e confiabilidade dos equipamentos; flexibilidade operacional; localização geográfica e disposição final do lodo gerado (LIBÂNIO, 2010; ABDO et al., 2020).

No Brasil, o tratamento de água mais empregado é o convencional, indicado para tratar águas superficiais, e fortemente influenciado pela qualidade da água bruta. Este tipo de tratamento é constituído por seis operações básicas, sendo elas: coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração, desinfecção e correção de pH, em alguns casos também é utilizado a fluoretação (BOTERO et al., 2009; HUANG et al., 2016).

2.7.1 Processo de coagulação e floculação

A coagulação pode ser descrita como o processo de desestabilização elétrica de partículas coloidais através da adição de produtos, coagulantes, que podem ser de origem orgânica ou inorgânica (MOSQUEIRA; CARLOS; HILARES, 2023).

Existem duas etapas para realizar a coagulação/floculação; a primeira é a mistura rápida, onde a água é submetida a um processo turbulento instantâneo que facilita a dispersão do coagulante por toda a massa aquosa. Na sequência, ocorre um processo de mistura lenta, no qual a floculação acontece (ABDO et al., 2020; MOSQUEIRA; CARLOS; HILARES, 2023).

Como descrito, a floculação é promovida por agitação lenta, pois esta favorece as colisões necessárias para o crescimento das partículas, com isso facilitando o processo seguinte, no caso, a sedimentação por gravidade (MOSQUEIRA; CARLOS; HILARES, 2023; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2021). Ou seja, a coagulação e a floculação ocorrem sucessivamente até a adesão entre as moléculas e a formação do floco, ocorrendo, então, a próxima etapa, sedimentação (ABDO et al., 2020).

A eficiência da coagulação/floculação depende da seleção do coagulante, da otimização dos parâmetros relacionados ao processo, como: pH, dosagem do agente coagulante, tempo de mistura, tempo de sedimentação, dentre outros. Uma otimização adequada desses fatores pode aumentar, significativamente, a eficiência do tratamento (MOMENI et al., 2018).

2.7.1.1 Mecanismos de coagulação

A coagulação é um processo complexo, no qual diversos mecanismos físico-químicos estão envolvidos para que haja a remoção do material presente nas águas brutas, sejam estes dissolvidos, coloidais e/ou em suspensão. Desta forma, além da caracterização básica, a coagulação, constitui-se da conjunção de quatro mecanismos, que podem, inclusive, ocorrer simultaneamente, sendo eles: compressão da camada difusa; adsorção e neutralização; varredura; e adsorção e formação de pontes interpartículas (LIBÂNIO, 2010).

2.7.1.1.1 Compressão da camada difusa

O primeiro mecanismo de coagulação apresentado, consiste na compressão da camada difusa, ou ainda, compressão de dupla camada. Acontece devido ao aumento da força iônica do meio, ocasionado pela elevação da concentração de íons, ou pelo uso de cátions de carga positiva elevada. 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 (LIBÂNIO, 2010; LIMA JÚNIOR; ABREU, 2018).

Em outras palavras, a introdução de um eletrólito no sistema coloidal irá provocar um aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuir a “esfera” de influência das partículas, ocorrendo a coagulação por compressão da dupla camada difusa. As concentrações elevadas de íons positivos e negativos ocasionam um acréscimo de íons na camada difusa que, para se manter eletricamente neutra, necessariamente, passam a ter seu volume reduzido, de forma que as forças de Van der Waals se tornam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática, permitindo que as partículas se aproximem o suficiente para formar flocos (BERNARDO, 2004).

2.7.1.1.2 Adsorção-neutralização

O segundo mecanismo, também denominado adsorção-neutralização ou neutralização de cargas, ocorre imediatamente após a dispersão do coagulante na massa líquida, e consiste na interação desenvolvida entre coagulante-coloide, coagulante-solvente e coloide-solvente (BERNARDO, 2004; LIBÂNIO, 2010).

A neutralização da carga negativa presente na superfície das partículas coloidais acontece através do uso de cátions metálicos hidrolisados ou polímeros orgânicos catiônicos (LIMA JÚNIOR; ABREU, 2018). Os polímeros utilizados como coagulantes apresentam comportamentos de adsorção nas superfícies das partículas coloidais, visto que, estas são de carga contrária à superfície dos coloides, ocorrendo assim a desestabilização. A adsorção-neutralização utiliza coagulantes em dosagens inferiores quando comparados a coagulação por dupla camada (PAVANELLI, 2001).

2.7.1.1.3 Varredura

De acordo com Di Bernardo (2004), no mecanismo de varredura, poderá ocorrer a formação de precipitados conforme a quantidade de coagulante, do pH do meio e da concentração de alguns tipos de íons na água. As partículas coloidais presentes se comportam como núcleos de condensação para estes precipitados e, desta forma, são removidas por sedimentação.

Conforme delineado por Lima Júnior e Abreu (2018), nesse processo, ocorre a criação de precipitados que são insolúveis, amorfos e gelatinosos, os quais atuam como uma espécie de captura para as partículas coloidais. Isso faz com que os núcleos formados em torno das partículas cresçam e, desse modo, atraem e removem outras partículas próximas.

O mecanismo da varredura é intensivamente utilizado nas estações de tratamento de água em que se tem a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração rápida. Em geral, os flocos obtidos com esse mecanismo são maiores e sedimentam mais facilmente que os flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção-neutralização de cargas (BERNARDO, 2004).

O mecanismo da varredura notoriamente utiliza dosagens mais elevadas, quando comparadas as utilizadas na adsorção-neutralização. Desta forma, o floco formado adquire maior peso, sedimentando com maior facilidade nas unidades de decantação, tornando tal mecanismo predominante nas estações convencionais de tratamento de água (LIBÂNIO, 2010).

2.7.1.1.4 Adsorção e formação de pontes interpartículas

Mecanismo desenvolvido por meio da utilização de polímeros de grandes cadeias moleculares (naturais ou sintéticos), como coagulantes, por conterem sítios ionizáveis ao longo de suas cadeias, estes podem ser classificados como: catiônicos, aniônicos, anfóteros. Atuando como ponte, que tanto podem ocorrer através de ligações decorrentes de forças de atração eletrostática, quanto pela prevalência de pontes de hidrogênio ou das forças de Van Der Waals, entre a superfície à qual estão

aderidos e outras partículas, permitindo assim, uma aglomeração mais eficiente (LIBÂNIO, 2010; LIMA JÚNIOR; ABREU, 2018).

Para tal finalidade, a molécula do polímero deve ser longa o suficiente para minimizar o efeito repulsivo da dupla camada quando há aproximação de mais de uma partícula e permitir a adsorção em sua superfície. Existe relação direta entre a área superficial das partículas coloidais e a dosagem ótima dos polímeros, sendo que, na melhor agregação não necessariamente ocorre potencial zeta nulo (LIBÂNIO, 2010).

2.8 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS NATURAIS E TRATADAS

A água é de extrema importância para o desenvolvimento social, econômico e político de um país, e principalmente, é indispensável para a manutenção da vida dos seres vivos. No entanto, com a intensificação das ações antrópicas e a veemência que vem ocorrendo as mudanças climáticas, a disponibilidade de água tem sido afetada de maneira drástica, sobretudo, com relação a água potável (GUO et al., 2019; ZHANG et al., 2016).

A qualidade da água também se relaciona com a sua utilidade. A água destinada a utilização humana, tanto para o consumo, preparo de alimento e higiene deve estar de acordo a legislação e livre de qualquer tipo de impureza (BRASIL, 2021). De uma forma geral, as águas naturais utilizadas para o abastecimento humano, necessitam passar por uma série de tratamentos para adquirir a qualidade exigida, em outras palavras, se adequarem aos padrões de potabilidade.

Para Von Sperling (2014) e Veríssimo (2018), a qualidade da água pode ser representada por parâmetros distintos, sendo eles expressos em suas características físicas, químicas e biológicas/microbiológicas. Estes definem se a água está ou não adequada à sua finalidade, em especial o consumo humano. Segundo Libânio (2010), as características físicas são as que causam impacto imediato no consumidor. Neste trabalho as características físicas analisadas foram: temperatura, cor e turbidez.

As características químicas, determinam de maneira precisa a qualidade da água analisada, apresentando um alto nível de importância econômico e sanitário (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2021). Neste trabalho as características químicas

analisadas foram: pH e alcalinidade. É de suma importância destacar que os parâmetros físico-químicos são influenciados pelas características da bacia hidrográfica, sendo assim sofrem variações conforme o local de estudo (BONIFÁCIO; NÓBREGA, 2021).

Segundo Bonifácio e Nóbrega (2021), os parâmetros biológicos estão diretamente relacionados com os microrganismos presentes na água. Estes apresentam funções vitais dentro dos ciclos biogeoquímicos, entretanto quando se trata da qualidade da água são indicadores de contaminação fecal (coliformes) estando associados a doenças de veiculação hídrica. Destaca-se que as análises microbiológicas não foram tema neste estudo.

A Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece os valores máximos permitidos de cor e turbidez para água de abastecimento, após o tratamento, as quais serviram de base para a comparação e discussão dos resultados. Além disso, no anexo 11 desta portaria, são estabelecidos valores para os padrões organolépticos de potabilidade, alguns destes estão listados na tabela 2.

Tabela 2 – Padrão organoléptico de potabilidade para alguns parâmetros.

Parâmetro	Unidade	VMP⁽¹⁾
Alumínio	mg/L	0,2
Amônia (como N)	mg/L	1,2
Cloreto	mg/L	250
Cor Aparente (²)	uC	15
1,2 diclorobenzeno	mg/L	0,001
1,4 diclorobenzeno	mg/L	0,0003
Dureza total	mg/L	300
Ferro	mg/L	0,3
Gosto e odor	Intensidade	6
Manganês	mg/L	0,1
Monoclorobenzeno	mg/L	0,02
Sódio	mg/L	200
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	500
Sulfato	mg/L	250
Sulfeto de hidrogênio	mg/L	0,05
Turbidez (³)	uT	5
Zinco	mg/L	5

NOTAS:

- (1) Valor máximo permitido.
 (2) Unidade Hazen (mgPt-Co/L).
 (3) Unidade de turbidez.

Fonte: BRASIL (2021).

Assim sendo, serão abordados aspectos considerados importantes e que serviram de embasamento teórico para o desenvolvimento do presente estudo dentro da abordagem dos parâmetros físico-químicos de qualidade das águas naturais e tratadas. Na sequência, estão descritas algumas das características físico-químicas da água, tendo em vista as de maior importância com relação ao estudo em questão, sendo elas: turbidez, cor e temperatura (parâmetros físicos) e alcalinidade e pH (parâmetros químicos).

2.8.1 Turbidez

A turbidez pode ser descrita como uma medida fotométrica, a qual representa o grau de interferência da passagem de luz na água. As partículas presentes na água,

suspensas e coloidais, provocam a absorção e a dispersão da luz, com isso ocasionando a aparência turva à água (BONIFÁCIO; NÓBREGA, 2021).

Os principais responsáveis pela elevação da turbidez em águas naturais são os sólidos em suspensão, como fragmentos de solo: silte, argila e areia, plâncton, bactérias, algas, vírus, matéria orgânica e inorgânica, produtos químicos orgânicos artificiais. Além de, carbonato de cálcio em águas duras e residuais metálicos (íons de alumínio e ferro) em águas tratadas (ABDO et al., 2020; BONIFÁCIO; NÓBREGA, 2021; LIBÂNIO, 2010).

Além disso, este parâmetro também é influenciado pela precipitação, um vez que causa a lixiviação de material particulado do solo para dentro dos corpos d'água. As alterações na precipitação são responsáveis por alterar a vazão dos cursos d'água o que também causa um processo erosivo e eleva a turbidez (BONIFÁCIO; NÓBREGA, 2021).

Com relação a potabilidade, a turbidez, é o parâmetro mais utilizado para monitorar a qualidade da água e avaliar os processos nas estações de tratamento, principalmente devido ao seu baixo custo e à facilidade de aplicação (LIBÂNIO, 2010).

A turbidez geralmente é verificada através do uso de um equipamento chamado turbidímetro. Este aparelho mede a quantidade de luz que é dispersa, uma vez que ocorre a passagem de um feixe de luz através da amostra sob análise, este é espalhado em ângulos retos quando há interação com as partículas suspensas. As partículas possuem como característica absorver a energia da luz e irradiar a luz em todas as direções, novamente. Os resultados são apresentados em unidade de turbidez nefelométrica (NTU) ou então em uT (unidade de turbidez), estas equivalem 1:1 (YAO; NAN; CHEN, 2014).

Os baixos índices de turbidez estão diretamente relacionados com a alta qualidade da água e com a baixa probabilidade de transmissão de doenças vinculadas a transição hídrica (YAO; NAN; CHEN, 2014). Segundo Libânio (2010), a turbidez das águas utilizadas para o abastecimento público podem variar de 3 a 500 uT, para águas superficiais, enquanto que, as águas subterrâneas podem apresentar valores menores que 1 uT.

Com a finalidade de se alcançar os padrões de turbidez adequados, são utilizadas tecnologias convencionais no tratamento de água, em especial coagulação, seguida de floculação, sedimentação e filtração. Diante do exposto, o sucesso do

tratamento da água está diretamente relacionado com o coagulante e o seu uso adequado (ABDO et al., 2020).

2.8.2 Cor

De modo geral, a água, totalmente ausente de cor, é considerada pura. A cor é produzida pela absorção de luz pelas partículas presentes na água, geralmente proveniente da matéria orgânica, assim com metais e resíduos industriais. A cor apresenta variação quanto a quantidade e ao tipo de material presente (BRASIL, 2013; VON SPERLING, 2014; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2021).

A cor quando originada naturalmente, para Von Sperling (2014), não apresenta risco direto à saúde humana, porém, em águas com cor muito elevada deve-se ter um maior cuidado operacional durante as fases do sistema de tratamento.

Conforme apontado por Richter e Azevedo Netto (2021), a cor da água guarda uma estreita correlação com seu pH. Isto é evidenciado pelo fato de que em pH baixo, a remoção da coloração se torna mais simples, enquanto em pH elevado, a intensidade da cor se acentua, tornando a remoção mais desafiadora.

A cor pode ser classificada em cor verdadeira e cor aparente. A cor aparente está presente quando além da cor a água também apresenta turbidez, quando a turbidez é removida tem-se a cor verdadeira. A cor pode ser medida em duas unidades, são elas: uC (unidade de cor) ou uH (unidade Hazen – mgPt-Co/L), ambas se correspondem 1:1 (VON SPERLING, 2014).

Para os sistemas de abastecimentos de água a cor é extremamente indesejável e a verificação deste parâmetro é fundamental, pois a cor elevada provoca a rejeição da água por parte do consumidor (BRASIL, 2013). De encontro ao exposto, a Portaria GM/MS Nº 888/2021 estabelece que a cor aparente da água para o consumo humano não deve ultrapassar o valor de 15 uC.

2.8.3 Temperatura

A temperatura está vinculada com a intensidade de calor. As alterações sofridas neste parâmetro podem ser de origem natural, relacionadas a transferência de calor entre a atmosfera e o solo e, por origens antrópicas, como por exemplo através da adição de efluentes (BONIFÁCIO; NÓBREGA, 2021; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2021; VON SPERLING, 2014).

Devido as suas características, a temperatura é um fator importante a ser analisada, pois está diretamente relacionada as demais propriedades da água, visto que influencia a taxa das reações físicas, químicas e biológicas, fato que ocasiona acréscimo no consumo de oxigênio dissolvido, além da diminuição da solubilidade de gases, deste modo, acentua as impressões de sabor e odor desagradáveis (BONIFÁCIO; NÓBREGA, 2021; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 2021; VON SPERLING, 2014).

2.8.4 Alcalinidade

A alcalinidade em águas naturais pode ser descrita como a capacidade de neutralizar ácidos fortes (íons H^+), ou ainda, como a capacidade de minimizar as variações significativas de pH. Ela é constituída principalmente de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-), e secundariamente por ácidos fracos, os quais possuem efeitos pouco conhecidos, tais como hidróxidos, silicatos, boratos, fosfatos e amônia (LIBÂNIO, 2010; VON SPERLING, 2014).

A alcalinidade se manifesta de três formas distintas em função do pH. Em águas que o pH varia de 4,4 a 8,3 a alcalinidade sofre influência apenas dos bicarbonatos, enquanto que, em águas com pH de 8,3 a 9,4 a alcalinidade é dada em virtude dos bicarbonatos e carbonatos e nas águas com pH superior a 9,4 a alcalinidade decorre da presença de carbonatos e hidróxidos (LIBÂNIO, 2010; VON SPERLING, 2014).

Com relação a potabilização da água para consumo humano, a alcalinidade tem função de destaque no processo de coagulação, ela minimiza a redução significativa do pH após a adição do coagulante, visto que, os coagulantes mais

utilizados são ácidos derivados de alumínio e ferro (LIBÂNIO, 2010; VON SPERLING, 2014).

Segundo Brasil (2013), a alcalinidade é de importância vital durante o processo de tratamento de água, pois é a partir do teor de alcalinidade que se estabelece a dosagem dos produtos químicos utilizados neste tipo de tratamento. Quando a alcalinidade está muito baixa ou muito elevada é necessária a realização de técnicas que possibilitem interação da água com o coagulante.

Entretanto, a alcalinidade não tem significado sanitário direto, porém tem relação com a coagulação e a prevenção de corrosão nas tubulações (VON SPERLING, 2014).

2.8.5 pH

O pH, potencial de hidrogênio, pode ser descrito como um termo utilizado para expressar a intensidade ácida ou alcalina de uma solução. O pH possui uma faixa de amplitude que varia de 0 a 14, conforme a concentração de íons de hidrogênio (H^+) ou de suas atividades. Dentro da amplitude do pH, valores inferiores a 7 são considerados ácido, pH em torno de 7 representa a neutralidade e pH acima de 7 indica condições básicas (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991; VON SPERLING, 2014; LIBÂNIO, 2010).

O potencial de hidrogênio, quando relacionado a água, não representa riscos para a saúde pública, porém quando os valores são muito extremos, tanto muito baixos quanto muito elevados, podem ocasionar irritações nas mucosas dos consumidores (VON SPERLING, 2014).

Em relação ao tratamento da água, o pH é de extrema importância, sendo um dos parâmetros monitorados com maior frequência nas estações de tratamento, pois influencia e interfere em diversos processos, desde a adição do coagulante até a desinfecção química. O monitoramento é realizado através de um equipamento chamado de potenciômetro, ou como é conhecido popularmente pHmetro (LIBÂNIO, 2010).

O pH influencia diretamente na solubilidade de diversas substâncias, e conseqüentemente na intensidade de cor, na distribuição das formas livres e ionizadas

de diversos compostos químicos e define também o potencial de toxicidade de vários elementos (LIBÂNIO, 2010).

Os valores de pH extremamente baixos apresentam potencial corrosivo e agressivo as tubulações e demais peças do sistema de abastecimento de água. Já quando os valores de pH são elevados, pode ocorrer incrustações nas peças e tubulações dos sistemas de tratamento (LIBÂNIO, 2010;VON SPERLING, 2014).

3 MATERIAS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo, consiste em uma análise experimental na qual foi desenvolvido uma simulação, com o intuito de avaliar a capacidade de floculação da quitosana não adulterada e das quitosanas sintetizadas em diferentes soluções: ácida, básica e neutra, em comparação com os reagentes convencionais utilizados no tratamento de águas com turbidez elevada (100-180 NTU), neste estudo, sulfato de alumínio e Tanfloc SG. Os procedimentos de cationização foram adaptados de publicações anteriores. Todas as etapas da pesquisa, descritas a seguir, foram desenvolvidas na Universidade Federal de Santa Maria, *Campus* de Frederico Westphalen – RS. Deste modo, a pesquisa se caracteriza por seu carácter experimental exploratório, através do qual se buscou, sobretudo, demonstrar o potencial de utilização da quitosana cationizada como uma opção de coagulante/floculante orgânico ao mercado.

3.1 REAGENTES E MATÉRIAS-PRIMAS

Para a cationização da quitosana nas diferentes soluções (ácida, básica e neutra), inicialmente, foi empregado o reagente cloreto de 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamônio, também conhecido como QUAB 188, (P.M = 188,65 g/mol, densidade = 1,1751 g/cm³), solução de 65%, cedido pela empresa *Dow Chemical Company*.

Posteriormente, o reagente cloreto de 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamônio teve de ser adquirido de outra marca, em virtude do primeiro material ter se esgotado. O novo produto foi obtido com a empresa Sigma-Aldrich. Este novo material não apresenta características iguais ao anterior, visto que possui P.M de 188,10 g/mol e densidade de 1,154 g/cm³, em solução de 60%. Porém, apresenta as mesmas propriedades, não prejudicando o desenvolvimento da pesquisa.

A quitosana utilizada para o processo de cationização e na confecção dos coagulantes/floculantes, possui peso molecular médio, com grau de pureza mínimo de 75%, é comercializada em forma de pó e obtida através da desacetilação da quitina, Poly(D-glucosamina). A qual, também foi adquirida da empresa Sigma-Aldrich.

Além da quitosana, foram utilizados outros dois coagulantes/floculantes, sulfato de alumínio e Tanfloc SG. Sendo que, o sulfato de alumínio hidratado P.A. ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (14-18) H_2O), em pó, com teor de 98 – 102% foi produzido pela empresa Vetex Química Fina. Enquanto, o floculante orgânico Tanfloc SG, em pó, possui umidade de 4,5 a 6,5% ao embalar, e pH em solução aquosa entre 1,8 e 2,7. Este foi cedido cordialmente pela empresa Tanac S/A.

Com relação a água utilizada para as simulações, foi observada a necessidade de se elevar a turbidez da água bruta coletada, uma vez que esta apresentava índices de turbidez extremamente variáveis conforme o dia da coleta, com isso, poderia ocorrer interferência na avaliação do desempenho dos coagulantes testados. Desta forma, a turbidez da água foi adulterada através da adição de caulinita, obtida da empresa Sigma-Aldrich.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE QUITOSANA CATIONIZADA

A quitosana foi cationizada com CHPTAC, cloreto de 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamônio, como descrito na literatura por: Gruškiene; Deveikyte; Makuška, (2013); Lu et al., (2014); Momeni et al., (2018); Seong; Whang; Ko, (2000), para a obtenção do sal de amônio quaternário de quitosana, o cloreto de N-(2-hidroxil)-propil-3-trimetilamônio quitosana (HTCC). Este, será mencionado no trabalho como quitosana cationizada/sintetizada, e receberá as seguintes denominações conforme o tipo de solução utilizada na cationização, em três tratamentos: quitosana cationizada em solução básica (QCSB), quitosana cationizada em solução neutra (QCSN) e quitosana cationizada em solução ácida (QCSA). A quitosana não adulterada, que não passou pelo processo de cationização recebeu a denominação de QP, quitosana pura.

3.2.1 Cálculo da massa molar da quitosana

Segundo a literatura, como descrito por Pei et al. (2009), a massa molar da quitosana pode ser calculada com base nas unidades de glucosamina presentes na parte esquerda e na parte direita da sua molécula, sendo que, os monômeros da

unidade de glucosamina e unidade de N-acetilglucosamina equivalem a sua massa molar (g), respectivamente, 161,2 e 203,2. Desta forma, o peso molar médio (M_o) da quitosana pode ser calculado com base na seguinte fórmula:

$$M_o = 161,2 (DD) + 203,2 (1 - DD)$$

Onde:

- M_o = é o peso molar médio;
- DD = é o grau de desacetilação.

Os valores do peso molar médio foram utilizados para os cálculos das proporções necessárias de quitosana em relação aos demais reagentes que seriam empregados nas próximas etapas da pesquisa, assim como, para as conversões de unidades (g, g/mol e mmol) destas proporções.

3.2.2 Técnica de cationização da quitosana

A cationização da quitosana foi realizada de acordo com adaptações nas técnicas descritas por Gruškiene, Deveikyte e Makuška (2013), as quais estão expostas nos próximos tópicos.

Além disso, é de importância ressaltar que em toda as técnicas de cationização foram consideradas concentrações de 1 g de quitosana para 3 g de CHPTAC, o equivalente a 23 mL desta solução.

3.2.2.1 Cationização em solução neutra

Em um Becker foram dissolvidos 5 g (30,73 mmol) de quitosana em 100 mL de água destilada. Levou-se a mistura à uma chapa de aquecimento com agitação constante, na qual ocorreu a elevação gradual da temperatura até atingir 80°C.

Em seguida, adicionou-se por meio de gotejamento, com auxílio de bureta graduada, 23 mL do CHPTAC na solução neutra contendo quitosana, este processo

teve duração de, em média, 30 minutos. Manteve-se a solução nas condições descritas durante cerca de 2 horas e 30 minutos.

Após deste período, resfriou-se a mistura reacional em temperatura ambiente ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) e adicionou-se 50 mL de acetona previamente gelada ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Deixou-se a mistura reacional resultante em refrigeração ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) por aproximadamente 12 horas.

Com a refrigeração ocorreu a precipitação de um produto, este foi filtrado a vácuo, lavado várias vezes (± 3) com acetona e levado à estufa a 60 a 65°C. Manteve-se o produto seco em frascos vedados até a realização das próximas etapas da pesquisa.

3.2.2.2 Cationização em solução básica

Em um Becker foram dissolvidos 5 g (30,73 mmol) de quitosana em 100 mL de NaOH a 1%. Levou-se a mistura a uma chapa de aquecimento com agitação constante, na qual ocorreu a elevação gradual da temperatura até atingir 70°C. Após a estabilização da temperatura a solução permaneceu em agitação nestas condições por 30 minutos.

Em seguida, foram adicionados por gotejamento, com auxílio de bureta graduada, 23 mL do CHPTAC, este processo teve duração de, em média, 30 minutos. Manteve-se a solução reacional nas condições descritas durante cerca de 4 horas. Posteriormente, resfriou-se a mistura reacional até atingir temperatura ambiente ($\pm 20^{\circ}\text{C}$).

Quando a temperatura da reação se igualou a do ambiente ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) adicionou-se 100 mL de metanol. Com isso, levou-se a nova mistura a um agitador magnético, no qual, manteve-se a agitação constante por 3 horas. Após este período, adicionou-se 100 mL de acetona previamente gelada ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) a solução, e deixou-se a mistura reacional resultante em refrigeração ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) por aproximadamente 12 horas.

Com a refrigeração ocorreu a precipitação de um produto, este foi filtrado a vácuo, lavado várias vezes (± 3) com acetona e levado à estufa a 60 a 65°C. Manteve-se o produto seco acondicionado em frascos vedados até a realização das próximas etapas da pesquisa.

3.2.2.3 Cationização em solução ácida

Em um Becker foram dissolvidos 5 g (30,73 mmol) de quitosana em 250 mL de ácido acético ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$) a 1%. Levou-se a mistura a uma chapa de aquecimento com agitação constante, na qual ocorreu a elevação gradual da temperatura até atingir 70°C. Após a estabilização da temperatura a solução permaneceu em agitação nestas condições por 30 minutos.

Em seguida, foram adicionados por gotejamento, com auxílio de bureta graduada, 23 mL do CHPTAC, este processo teve duração de, em média, 30 minutos. Manteve-se a solução reacional nas condições descritas durante cerca de 4 horas. Posteriormente, resfriou-se a mistura até atingir a temperatura ambiente ($\pm 20^\circ\text{C}$) e adicionou-se 100 mL de acetona previamente gelada ($\pm 2^\circ\text{C}$). Na sequência, deixou-se a solução ácida contendo quitosana em refrigeração ($\pm 5^\circ\text{C}$) por aproximadamente 12 horas.

Com a refrigeração ocorreu a precipitação de um produto, este foi filtrado a vácuo, lavado várias vezes (± 3) com acetona e levado à estufa a 60 a 65°C. Manteve-se o produto seco em frascos vedados até a realização das próximas etapas da pesquisa.

3.2.3 Análise do grau de substituição

Com o objetivo de determinar o grau de substituição (DS) dos derivados das quitosanas sintetizadas nas três soluções distintas (neutra, ácida e alcalina), realizou-se o processo de titulação com nitrato de prata de acordo com adaptações nas técnicas elaboradas por Lu et al. (2014), como exposto a seguir.

3.2.3.1 Titulação com nitrato de prata (AgNO_3)

Para a realização da titulação, 0,10 g de cada amostra de quitosana cationizada (HTCC) foram dissolvidos em 50 mL de água deionizada e adicionou-se 1 mL do

indicador de cromato de potássio (K_2CrO_4) à solução de HTCC. Esta, foi titulada com uma solução padrão de 0,1000 mol/L de $AgNO_3$, o gotejamento ocorreu até a formação de um depósito vermelho na solução de HTCC. Outros 50 mL de água deionizada foram usados para realizar uma titulação em branco nas mesmas condições.

Com o intuito de verificar o grau de substituição através do método de titulação Lu et al. (2014) desenvolveram a seguinte equação:

$$DS = \frac{(V_2 - V_1) \times M \times 314}{G \times 10^3}$$

Onde:

- DS é o grau de substituição de HTCC;
- V_1 e V_2 são o volume (mL) de solução padrão de $AgNO_3$ que 50 mL de água deionizada e solução de HTCC usaram, respectivamente,
- 314 é a massa molar (g/mol) de HTCC;
- G é a massa (g) de HTCC, e
- M é a concentração molar (mol/L) da solução padrão de $AgNO_3$.

Por meio desta equação é possível verificar a porcentagem de unidades D-glucosamina da quitosana que tiveram substituição através da adição de CHPTAC e estimar a qualidade do material cationizado, com base no volume de $AgNO_3$ gasto na titulação.

3.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO

A seguir, serão abordados os métodos empregados nos ensaios de coagulação, desde o desenvolvimento dos coagulantes até a forma que estes foram avaliados.

Inicialmente é apresentada as técnicas de preparo de todos os coagulantes/floculantes testados. Também é exposto determinadas informações sobre a água bruta utilizada, bem como, sobre a água sintética e como sucedeu-se o procedimento de alteração de turbidez.

Na sequência, são esclarecidos os parâmetros de controle das análises, as dosagens utilizadas para cada coagulante testado e os procedimentos desenvolvidos durante os ensaios de coagulação no Jar-test.

Os dados obtidos com estes processos foram utilizados para a realização de análises quanto ao índice de remoção de cor e turbidez que cada coagulante propiciou, e para a elaboração de diagramas de coagulação.

3.3.1 Floculantes e coagulantes

Neste trabalho analisou-se diferentes floculantes orgânicos, sendo eles: quitosana catiônica obtida em três diferentes soluções aquosas (ácida, básica e neutra – QCSA, QCSB e QCSN) e quitosana não adulterada (QP), todas com concentração de 2%, em comparação como o coagulante orgânico comercializado Tanfloc SG, preparado em diferentes concentrações 1% e 2%. Ambos os coagulantes orgânicos foram comparados com coagulante do tipo inorgânico - sulfato de alumínio (1%), recomendado pelo fabricante.

O preparo das soluções floculantes para cada componente principal, ocorreu de forma distinta, como descrito a seguir.

3.3.1.1 Quitosanas (QP, QCSA, QCSB e QCSN)

A quitosana não adulterada (QP) e as quitosanas sintetizadas (QCSA, QCSB e QCSN) foram diluídas em água destilada em uma concentração de 2% (20 g/L). Para a diluição, adicionou-se as matérias-primas em um Becker sobre uma chapa de aquecimento com agitação constante, na qual foram mantidos por 5 minutos após a mistura atingir 80°C. Em seguida, o aquecimento foi cessado e o floculante resfriado somente com agitação até atingir a temperatura ambiente ($\pm 20^\circ\text{C}$). Para finalizar, com auxílio de instrumento volumétrico, pipeta graduada, completou-se o volume desejado do coagulante.

3.3.1.2 Tanfloc

O preparo do coagulante a base de Tanfloc SG foi realizado de acordo com adaptações na técnica elaborada por Hou et al. (2018). Para tal, a solução estoque de Tanfloc SG 2% (20 g/L) foi preparada através da adição do produto em pó em um Becker com água destilada, estes foram sobrepostos em agitador magnético a 100 RPM por cerca de 30 minutos, até ocorrer a diluição completa do produto. Para finalizar, com auxílio de instrumento volumétrico, pipeta graduada, completou-se o volume desejado do coagulante.

A mesma técnica foi utilizada no preparo da solução estoque de Tanfloc SG 1% (10g/L).

3.3.1.3 Sulfato de alumínio

O coagulante inorgânico escolhido para ser utilizado na pesquisa foi o sulfato de alumínio. O preparo deste coagulante foi realizado de acordo com adaptações na técnica elaborada por Hou et al. (2018), a qual foi desenvolvida para a preparação de coagulantes orgânicos, no caso, Tanfloc SG.

A solução estoque de sulfato de alumínio foi preparada através da adição do produto em pó em um Becker com água destilada, em temperatura ambiente ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) numa concentração de 1% (10 g/L). Estes foram sobrepostos em agitador magnético a 100 RPM por cerca de 20 minutos, até ocorrer a diluição completa do produto. Para finalizar, com auxílio de instrumento volumétrico, pipeta graduada, completou-se o volume desejado do coagulante.

Este produto foi escolhido tendo em vista que a sua versão comercial é a mais utilizada nas estações de tratamento de água.

3.2.2 Coleta de água bruta

A água bruta utilizada para a preparação da água sintética com turbidez elevada (100-180 NTU), foi coletada diretamente do Lajeado Pardo (27°23'31.35"S;

53°25'32.31"O), no município de Frederico Westphalen (RS), que está localizado a montante ($\pm 2,5$ km) do ponto de captação de água por bombeamento da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN - AEGEA).

As coletas foram efetuadas com auxílio de galões plásticos, nos quais eram armazenados de 40 a 50 litros de água antes de iniciar o experimento. A água foi conservada em temperatura ambiente ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) até a utilização, que ocorria ao longo do mesmo dia da coleta.

3.2.3 Preparo água sintética

Para conferir turbidez a água bruta utilizada em estudos é comum valer-se do uso de suspensões a base de argilominerais. Com base no exposto, e com intuito de elevar a turbidez da água bruta, neste estudo, adaptou-se a metodologia proposta por Di Bernardo (2004), como descrita a seguir.

O mineral argiloso selecionado para a confecção da suspensão foi a caulinita, para tal, 22 g deste material foram dissolvidos em 1 L de água destilada. Em seguida, levou-se a solução ao Jar-test para agitação, com programação de 200 RPM por 2 horas. Posteriormente, a solução resultante manteve-se em repouso por 12 horas.

Após este período, ocorreu a formação de um material sobrenadante, o qual, foi devidamente coletado da suspensão-mãe para que as partículas de maior tamanho fossem removidas, visando assim, reduzir os erros na preparação da água do estudo.

A água utilizada no estudo, água sintética, foi preparada através da adição gradual do sobrenadante resultante da solução de caulinita na água bruta, até atingir os valores de turbidez desejados, 100-180 NTU.

3.2.4 Parâmetros de controle

Com relação as análises de controle, foram avaliados os seguintes parâmetros: cor, pH, alcalinidade, temperatura e turbidez na água bruta e água sintética. As mesmas análises e métodos, com exceção da avaliação da alcalinidade, foram empregadas após o ensaio de clarificação para cada tratamento proposto.

As análises seguiram as metodologias elaboradas pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 2017). A Tabela 3 apresenta os equipamentos e métodos utilizados.

Tabela 3 – Métodos e equipamentos utilizados nas análises de pH, cor, turbidez, alcalinidade e temperatura.

Parâmetro	Equipamento	Limite de quantificação	Método
pH	pHmetro PH-1900 (Instrutherm)	0.01 pH / - 2.0 – 16.00 pH	4500 – H+ pH Value. B – Electrometric Method
Cor	Espectrofotômetro SPECORD 50 PLUS (Analytik Jena)	0,0003 A / -3 – 3 A	2120 – Color. C – Spectrophotometric: Single Wavelength Method
Turbidez	Turbidímetro DL1 – 5000 (DEL LAB)	0,01 uT / 0 – 1000 uT	2130 – Turbidity. B – Nephelometric Method
Alcalinidade	-	-	2320 – Alkalinity. B – Titration Method
Temperatura	-	-	2550 – Temperature. B – Laboratory and Field Methods

Fonte: Autora (2023).

3.2.5 Dosagens dos coagulantes

Após o preparo da água sintética e das análises dos parâmetros de controle, adicionou-se 2 L de água sintética em cada cuba do Jar-test, e através dos tubos de ensaio acoplados no aparelho, adicionaram-se dosagens fixas de coagulante/floculante para cada jarro. Deste modo, possibilitou-se a aplicação sincronizada do coagulante/floculante em todas as cubas.

Para as quitosanas (QCSA, QCSB, QCSN e QP) na concentração 2%, as dosagens testadas consistem em 15, 25, 35, 45, 55 e 65 mg/L. Realizou-se os ensaios em pH 3, 4, 5, 6, 7, e 8. Todos os ensaios foram realizados sobre as mesmas condições de tempo e agitação, listadas no próximo item deste trabalho.

Para o coagulante orgânico a base de Tanfloc SG, nas concentrações de 1% e 2%, testou-se as mesmas dosagens utilizadas nas quitosanas (15, 25, 35, 45, 55 e 65

mg/L). Os ensaios foram realizados nas mesmas faixas de pH e sob as mesmas condições operacionais, com características similares de cor e turbidez inicial.

Em relação ao coagulante inorgânico a base de sulfato de alumínio, as dosagens levaram em consideração apontamentos de Leme (1990). Este autor avaliou graus de turbidez em águas distintas e ponderou que em águas com turbidez acima de 100 uT, as concentrações necessárias de sulfato de alumínio variam de 16 a 32 mg/L.

Neste estudo, as dosagens utilizadas do coagulante a base de sulfato de alumínio consistem em 16, 20, 24, 28, 32 e 36 mg/L. Os ensaios foram realizados nas mesmas faixas de pH e sob as mesmas condições operacionais, com características similares de cor e turbidez inicial.

3.2.6 Procedimentos utilizados nos ensaios em Jar-test

Para verificar a eficiência dos coagulantes/floculantes desenvolvidos, foram realizados ensaios de coagulação, no equipamento Jar-test micro controlado, da marca PoliControl®, modelo Floc Control III com programação automática dos ensaios, capacidade de 6 jarros de até 2 L cada.

As etapas do ensaio de clarificação com o auxílio de Jar-test foram definidas com base em trabalhos anteriores realizados pela equipe de pesquisa (GRADE, 2022; SARTOR, 2021; TEJADA, 2022), as quais seguiram parâmetros operacionais distintos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros operacionais nos ensaios de coagulação

Etapas de tratamento	Operação
Coagulação	A mistura rápida, adição do coagulante, iniciou com velocidade de 350 RPM (gradiente de velocidade médio de 700 s^{-1}), mantida por 60 segundos.
Floculação	Programada para alterar a velocidade de 50, 40, 30 e 20 RPM (gradiente de velocidade médio de $40, 30, 18 \text{ e } 10 \text{ s}^{-1}$), duração de 5 minutos em cada etapa.
Decantação	Iniciou com o desligamento do aparelho, a velocidade de sedimentação é de $0,35 \text{ cm/min}$. O processo teve duração de 20 minutos, sendo que as amostras foram coletadas e analisadas nos tempos de 0 e 20 min.
Filtração	Realizada em papel filtro qualitativo, com gramatura de 80 g/m^2 , diâmetro de 150 mm, modelo FIL. P80150, marca Qualividros.

Fonte: Autora (2023).

3.2.7 Eficiência de remoção

Após a realização da simulação do tratamento da água (coagulação, floculação, decantação e filtração), a água do estudo foi novamente analisada quanto aos parâmetros de cor e turbidez, com o intuito de calcular a eficiência de remoção.

Desta forma, a eficiência de remoção foi verificada com base na equação abaixo:

$$\text{Eficiência de remoção (\%)} = \frac{V_{AB} - V_{AT}}{V_{AB}} \times 100$$

Onde:

V_{AB} : representa os valores de cor (uC) ou turbidez (uT) para a água bruta.

V_{AT} : representa os valores de cor (uC) ou turbidez (uT) para a água tratada.

Além da eficiência de remoção, os resultados foram comparados e discutidos com bases nos valores máximos permitidos de cor e turbidez para águas de abastecimento, após tratamento, determinados pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Sendo estes, listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valor máximo permitido para parâmetros de cor e turbidez

Parâmetro	Unidade	VMP(1)
Cor Aparente	uC	15
Turbidez	uT	0,5 – 1,0 ⁽²⁾ - 5 ⁽³⁾

Nota:

(1) - Valor máximo permitido

(2) – Padrão de turbidez para água após tratamento seguida de filtração rápida

(3) – Padrão organoléptico – (Em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) ou pontos de consumo)

Fonte: Adaptado de BRASIL (2021).

3.2.8 Diagramas de coagulação

Uma das formas de avaliar se o tratamento empregado é satisfatório consiste em utilizar os diagramas de coagulação. Ao realizar a análise através de diagrama de coagulação os valores das dosagens, pH, turbidez, cor remanescente, entre outros

parâmetros, que estejam sendo avaliados, podem ser facilmente visualizados (BARTIKO; JULIO, 2015; VALVERDE et al., 2013).

A utilização de diagramas de coagulação é ideal e confere veracidade ao estudo, atestando ou não a eficiência do coagulante analisado (SILVEIRA et al., 2019; VALVERDE et al., 2014). Como o uso do diagrama de coagulação associa diferentes condições e mecanismos, torna-se fundamental para o planejamento, análise e interpretação dos dados obtidos no Jar-test (KIM; MOON; LEE, 2001).

Os diagramas de coagulação foram confeccionados no *Software* Minitab Statistical 20. Com as ferramentas disponíveis no *Software* elaboraram-se gráficos de contorno, com isocurvas de cor e turbidez remanescente para os floculantes do estudo (QP, QCSA, QCSB e QCSN) bem como, para o coagulante comercial Tanfloc SG 1%, Tanfloc SG 2% e Sulfato de Alumínio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE QUITOSANA CATIÔNICA

As reações de cationização foram realizadas com grânulos de quitosana colocados em suspensão aquosa de NaOH, CH₃CO₂H e/ou água destilada. Após a solubilização dos reagentes, adicionou-se o monômero cloreto de 3-cloro-2-hidroxi-propiltrimetilamônio (CHPTAC), a modificação estrutural na molécula de quitosana ocorreu por meio de reações de substituição, N-substituição e/ou O-substituição (MADERA-SANTANA; HERRERA-MÉNDEZ; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, 2018).

O reagente CHPTAC pode reagir com três grupamentos distintos, 1 grupo amino e 2 grupos hidroxilas, sendo que, o valor máximo que pode ser alcançado para o grau de substituição é 3, ou seja, a enxertia do composto CHPTAC na molécula da quitosana pode ocorrer em até três locais. Desta forma, resultados em torno de 1 ou superiores a este valor são considerados aceitáveis.

4.1.1 Grau de substituição

Os resultados obtidos para o grau de substituição através da avaliação do teor percentual de cloreto são apresentados na Tabela 5, sendo que, as análises foram realizadas em triplicata.

Tabela 5 – Valores do grau de substituição (DS), cationização com CHPTAC.

Amostra	DS (1:3)	%DS
QCSA	1,39	46,33
QCSB	1,03	34,33
QCSN	0,80	26,66
Quitosana não adulterada (QP)	0	0

Fonte: Autora (2023).

Os valores de DS segundo classificação pelo grau de substituições, alcançados para as quitosanas catiônicas podem ser classificados como de média/alta

substituição. Deste modo, os valores de DS obtidos foram considerados satisfatórios para o prosseguimento do estudo.

As três soluções de quitosana submetidas à reação com CHPTAC diferiram em relação ao DS calculado, resultado esperado em virtude das diferentes reações químicas que ocorreram em cada solução aquosa desenvolvida.

Os resultados do estudo correspondem aos encontrados por Song et al. (2018), que obteve grau de substituição de 16,5% a 46,8%, em concentrações variáveis do reagente CHPTAC. Sendo que, o menor valor de DS deste estudo, QCSN – 26,66%, foi superior ao encontrado no estudo anterior, entretanto o resultado pode ser justificado pela concentração inferior de CHPTAC, pois com os valores de reagente idênticos, o grau de substituição mostrou-se similar, principalmente para QCSA.

Da mesma maneira, em um procedimento metodológico semelhante, adaptado para o estudo, Gruškiene, Deveikyte e Makuška (2013), empregaram o GTMAC como reagente e obtiveram valores de DS para QCSA entre 36% e 72%. No mesmo estudo, eles também avaliaram os DS para soluções preparadas em condições neutras e alcalinas, com resultados variando de 29% a 66% e de 2,6% a 95%, respectivamente. A ampla variação observada pode ser atribuída à discrepância na proporção molar entre a quitosana e o reagente, além de fatores como a concentração da base utilizada e a escolha de bases diferentes.

Os valores de QCSN foram os menores obtidos por este estudo, 26,66%, fato que pode ter sido influenciado pelo modo como a reação foi desenvolvida, visto que a quitosana foi dispersa somente em água destilada e ocorreu a adição gradual do reagente de eterificação. Peng et al. (2010) obtiveram valores de DS variáveis de 6, 18 e 44%, em solução de quitosana com água destilada, devido a variação na concentração de GTMAC, no estudo foi comprovado que maiores concentrações de reagente elevam o DS do produto.

O valor relativamente baixo do DS da QCSB (1,03 e/ou 34,33%), pode ser relacionado com a baixa solubilidade da quitosana em meio alcalino, pois restringe as reações do epóxido com os grupos hidroxilas somente às camadas superficiais da molécula (GRUŠKIENE; DEVEIKYTE; MAKUŠKA, 2013).

O uso de ácido acético faz com que os grupos epóxido se abram mais facilmente, intensificando a velocidade da reação e elevando o DS (PRADO; MATULEWICZ, 2014; SEONG; WHANG; KO, 2000). Fato que vai de acordo com o

resultado obtido, visto que o maior DS foi encontrado para o coagulante formulado em solução ácida (46,33%), comprovando que a diluição da quitosana em ácido acético potencializa a reação de cationização.

Além disso, os valores de DS podem estar relacionados com o cationizante utilizado no estudo, CHPTAC. Prado e Matulewicz (2014) relataram que o DS assim como a eficiência da reação é menor com a utilização de CHPTAC do que com o agente cationizante EPTAC. Todavia, em estudo utilizando EPTAC e ácido acético como agentes modificadores, o valor ótimo de DS encontrado foi de 1,04 após 18 horas de reação (SEONG; WHANG; KO, 2000), o qual é inferior ao do presente estudo, mesmo com a utilização de um reagente de menor eficiência.

Ainda com relação ao reagente de eterificação, ao comparar CHPTAC com estudo realizado por Mao et al. (2021), no qual foi realizada a enxertia de citrionelol na molécula de quitosana, pode-se observar a obtenção de valores de DS (1:3) relativamente mais baixos, 0,165, 0,199 e 0,182. Desta forma, o reagente empregado no estudo, CHPTAC, mostrou-se mais eficiente na cationização da quitosana. Entretanto, ao comparar o CHPTAC com o GTMAC e/ou o EPTAC, este demonstra eficiência inferior, porém os resultados ainda assim, são satisfatórios.

São vários os fatores que podem influenciar no valor do DS, dentre eles o tipo de reagente utilizado, a razão molar entre o reagente e o meio em que a solução foi preparada, temperatura e o tempo de reação. Em geral, um acréscimo no tempo da reação e o aumento na quantidade do reagente cationizante proporciona a elevação do DS, ambos possivelmente podem ser explicados pelo fato de haver maior disponibilidade de moléculas do reagente nas proximidades do polissacarídeo e/ou pelo tempo maior de exposição ao material (PRADO; MATULEWICZ, 2014; SONG et al., 2018).

Portanto, com os resultados obtidos, pode-se observar que por mais difíceis que os processos de modificação da estrutura da quitosana sejam, está foi modificada e cationizada nas diferentes soluções aquosas propostas inicialmente, resultados comprovados através dos graus de substituição obtidos na titulação com nitrato de prata, análise de cloreto.

4.2. ENSAIOS DE COAGULAÇÃO

Os dados apresentados a seguir guardam relação com os procedimentos desempenhados, a fim de testar a capacidade das quitosanas, não adulterada e sintetizadas, de removerem a cor e a turbidez em água com turbidez elevada (100-180 NTU). Para tanto, inicia-se com a apresentação dos resultados obtidos com as quitosanas nos ensaios de clarificação para turbidez e cor e, posteriormente, fêz-se um comparativo com demais coagulantes comerciais testados.

4.2.1 Jar test

Para simular o sistema de tratamento de água com a utilização das quitosanas catiônicas e da quitosana não adulterada como floculantes orgânicos utilizou-se o equipamento Jar test (Figura 7) seguido do processo de filtração em papel filtro de gramatura de 80 g/m². Com isso, foi possível definir os valores para turbidez e cor após o tratamento, bem como a eficiência do tratamento realizado.

Figura 7 - Simulação de tratamento da água com coagulante a base de quitosana no aparelho Jar test.



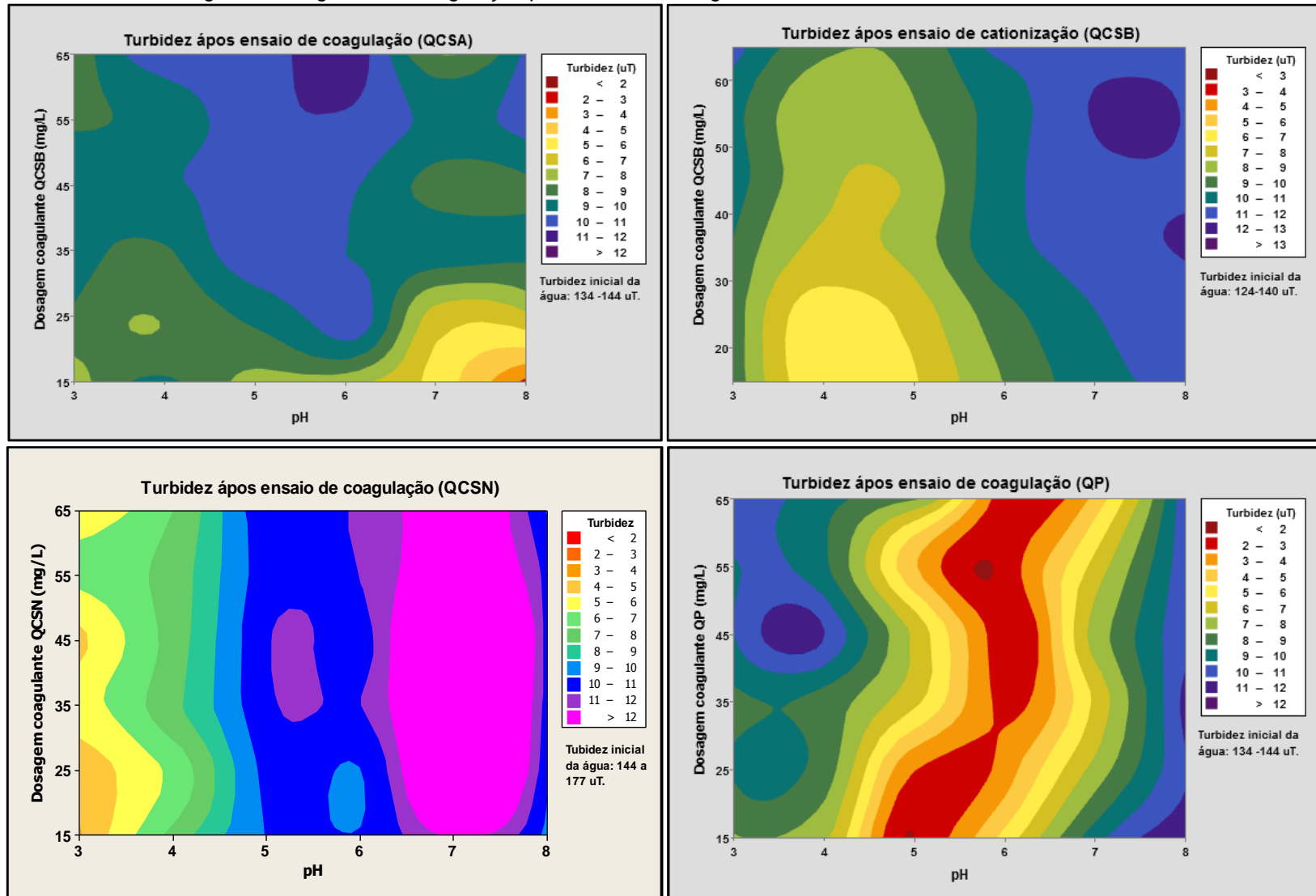
Fonte: Autora (2023).

Para facilitar o entendimento, foram construídos quadros contendo os dados principais dos ensaios de tratamento, como cor e turbidez (inicial e final) e a eficiência do tratamento. Os quadros completos, com todos os dados obtidos durante os ensaios de Jar test, em todos os tempos de coleta, e para todos os coagulantes/floculantes utilizados, são apresentados nos Apêndices do presente trabalho.

Com a combinação das variantes de pH e concentração dos floculantes utilizados, e os valores finais obtidos para cor e turbidez, elaboraram-se diagramas de coagulação, de modo a facilitar a observação e identificação de combinações (pH e concentração) que apresentaram melhor eficiência no tratamento.

A Figura 8, apresenta os diagramas de coagulação para o parâmetro de turbidez, com os agentes floculantes produzidos no estudo (QCSA, QCSB, QCSN e QP).

Figura 8 - Diagrama de coagulação para turbidez em água tratada com QCSA, QCSB, QCSN e QP.



Fonte: Autora (2023).

A partir dos dados obtidos para os valores remanescentes de turbidez, pode-se observar que o pH influenciou a eficiência dos tratamentos. Na sequência, serão destacados os valores, em NTU, que mais se aproximaram dos estabelecidos pela legislação brasileira para cada um dos coagulantes/floculantes testados.

O primeiro coagulante analisado foi o elaborado a base de QCSA, os melhores resultados obtidos para turbidez, foram de 5,63 e 2,75 NTU em pH 7,0 e 8,0 respectivamente, com índices de remoção de 95,9 e 97,9%, ambos com dosagem de 15 mg/L.

Com o coagulante a base de QCSB, os resultados mais próximos dos adequados foram encontrados em pH 4,0 com os valores de 6,30 e 6,43 NTU em concentrações de 15 e 25 mg/L, e com percentual de remoção de 94,9 e 94,8% respectivamente.

Ao analisar o coagulante a base de QCSN, observou-se que os melhores resultados foram obtidos em pH 3,0. No qual, os valores de turbidez encontrados foram de 4,59 e 3,89 NTU nas dosagens de 25 e 15 mg/L. Com eficiência de remoção de 97,4 e 97,8%. Os valores de turbidez remanescente obtidos para as quitosanas sintetizadas, no entanto, não atendem os parâmetros elencados no anexo 2 da Portaria Nº 888/2021, onde o valor máximo permitido para turbidez da água após o processo de filtração é de 1 uT.

Analisando o conjunto de resultados obtidos para turbidez remanescente da água de estudo, relacionando “dosagem x pH” os melhores valores conseguidos, de uma forma geral, foram em pH ácido. Com relação a dosagem de quitosana catiônica, a dosagem mais baixa apresentou resultados mais significativos.

A eficiência de remoção teve uma variação considerável entre as quitosanas catiônicas testadas, porém valores ótimos foram encontrados na casa dos 97%, sendo que o valor mais significativo foi de 97,9% com a QCSA, no qual a turbidez remanescente ficou próximo a 3,0 uT.

O coagulante que apresentou uma redução na turbidez próximo dos valores que se enquadram na legislação vigente em diferentes concentrações e em uma ampla faixa de pH foi o QP, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do coagulante QP: turbidez (uT), pH e percentual de redução em relação a turbidez inicial.

Concentração (mg/L)	pH	Turbidez (uT) ¹	Redução (%)
15	5,0	2,02	98,5
25	5,0	3,04	97,8
55	5,0	4,10	96,9
25	6,0	3,47	97,5
35	6,0	2,77	97,9
45	6,0	2,23	98,4
55	6,0	2,34	98,3
65	6,0	2,46	98,2
65	7,0	4,38	96,7

NOTA:

(1) 1 uT, valor máximo permitido após o processo de filtração segundo a Portaria GM/MS Nº 888/2021, anexo 2.

Fonte: Autora (2023).

Os resultados alcançados para QP se aproximaram dos valores estipulados pela legislação em vigor, porém, ainda não estão em conformidade com os critérios estabelecidos no Anexo 2 da Portaria Nº 888/2021. Embora os resultados de QP tenham apresentado desempenho considerável, as dosagens utilizadas para tal, de forma geral, foram elevadas em comparação com as quitosanas sintetizadas.

Com base nos ensaios realizados, é possível afirmar que todas as quitosanas testadas possuem potencial floculante considerável. Entretanto a QP se mostrou favorável a diminuição da turbidez em uma ampla faixa de pH, incluindo o pH em torno de 7,0, que é encontrado na natureza, em comparação com as faixas de pH 3,0 e 4,0, por exemplo, o qual a QCSN e a QCSB se adaptaram melhor.

Como exposto, a quitosana apresentou melhor desempenho como floculante quando não cationizada pelo método empregado neste estudo. Isto possivelmente ocorreu devido as propriedades insolúveis da molécula da quitosana, visto que para a confecção deste coagulante não ocorreu a completa diluição da mesma e seus grânulos podem ter influenciado no processo de floculação atraindo melhor as partículas aniônicas presentes na água.

A concentração de coagulante necessária no estudo foi superior a utilizada por Hamdon et al. (2022), que avaliaram a capacidade de redução de algas, turbidez, DBO, dentre outros parâmetros, no tratamento de água obtendo resultados de remoção de turbidez de 96,5 a 99,5% em concentração de 2 a 2,7 mg/L. Os autores também avaliaram o pH ótimo para o tratamento e constataram que pH de 7,0 a 7,49 é o mais indicado. Pontius (2016) também utilizou concentração baixa de quitosana,

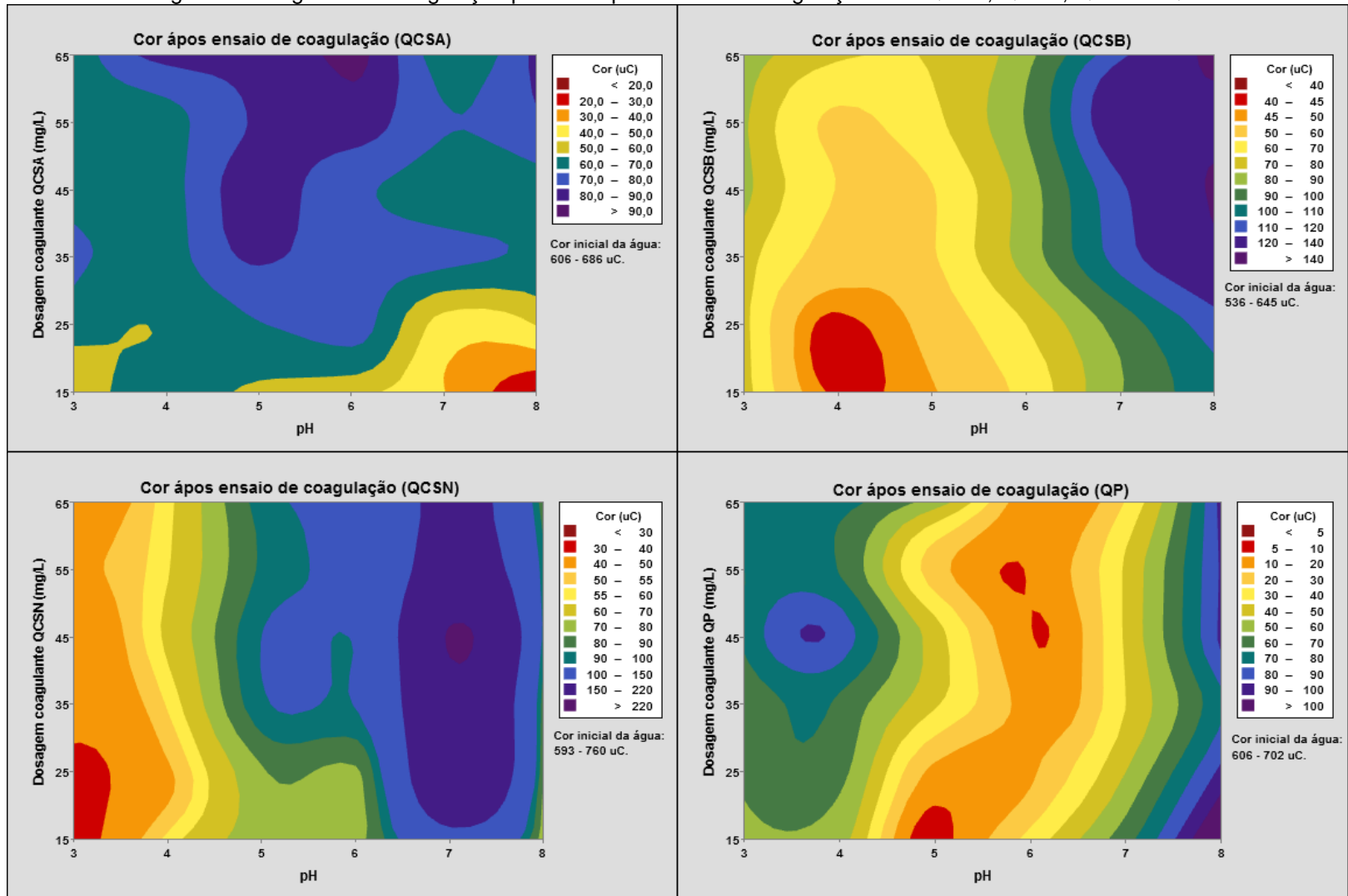
8 mg/L, e obteve eficiência de remoção de 96,9%, valor similar aos resultados promissores deste estudo.

Momeni et al. (2018) sintetizaram a quitosana com CHPTAC e utilizaram o produto para tratar água residual com turbidez inicial de 60 NTU, neste estudo obtiveram uma eficiência de remoção de 90,14% com a concentração de 3000 mg/L em pH próximo a 6,0.

A obtenção de valores de DS mais baixos para QCSB e QCSN refletem os desafios associados à síntese e à solubilização da quitosana, devido às suas fortes ligações de hidrogênio. Essas propriedades tornaram o processo de solubilização da quitosana complexo, e essas dificuldades se manifestaram nos resultados deste estudo. Notavelmente, o material que mostrou maior eficácia na remoção de turbidez entre os sintetizados foi a quitosana com um DS elevado (QCSA).

Relacionado ao parâmetro cor, a Figura 9, representa o diagrama de coagulação para a cor remanescente da água tratada com os floculantes cationizados e não cationizado no estudo.

Figura 9 – Diagrama de coagulação para cor após ensaio de coagulação com QCSA, QCSB, QCSN e QP.



Fonte: Autora (2023).

Após a realização do tratamento da água com as quitosanas, os menores valores remanentes de cor foram obtidos em pH 5,0 e 6,0 com o coagulante QP, sendo que, nesta faixa de pH, parte das dosagens testadas atingiu o padrão organoléptico de potabilidade elencados no anexo 11 da Portaria Nº 888/2021, sendo este de até 15 uC.

A dosagem de 15 mg/L de QP foi a que apresentou melhores resultados, atingindo cor de 5,60 uC, considerando a cor inicial da água de estudo, a eficiência do tratamento chegou a 99,1%. A Tabela 7 apresenta os valores que se enquadram no anexo 11 da Portaria Nº 888/2021.

Tabela 7 - Remanescente de cor com o floculante a base de QP.

Concentração (mg/L)	pH	Cor (uC)	Redução (%)
15	5,0	5,60	99,1
35	6,0	14,6	97,7
45	6,0	10,4	98,3
55	6,0	10,8	98,3
65	6,0	12,3	98,0

NOTA:

(1) 15 uC, valor máximo permitido após tratamento, segundo a Portaria GM/MS Nº 888/2021, anexo 11.

Fonte: Autora (2023).

Assim como para a turbidez, o coagulante QP apresentou os resultados próximos e dentro dos padrões aceitáveis também para a remoção de cor, entretanto, novamente foram necessárias dosagens maiores de coagulante, ressaltando que o efeito de remoção provavelmente ocorreu pela disponibilidade maior de partículas insolúveis de carga iônica diferente as disponíveis na água, fato que influenciou na floculação e posteriormente na sedimentação.

O coagulante QCSA não obteve nenhum valor de cor remanescente dentro do padrão organoléptico aceitável, sendo que, o valor próximo ao limite aceitável foi de 18,2 uC, no pH 8,0 e com percentual de remoção de 97,2%, na concentração de 15 mg/L.

O coagulante QCSN também não obteve nenhum valor dentro dos limites aceitáveis, sendo os mais próximos: 33,3 uC na concentração de 15 mg/L em pH 3,0 e com respectivo percentual de remoção 95,2%. Tanto os valores de QCSA e QCSN para cor e turbidez foram obtidos na mesma dosagem de coagulante e com os mesmos pH, indicando que estes são os valores nos quais os próximos estudos devem se atentar.

Ainda, a partir dos resultados obtidos, pode-se observar no tratamento com QCSB que houve aumento na cor remanescente a medida com que o pH da água aumentou, sendo esta condição elencada por Richter e Azevedo Netto (1991), que observaram que a remoção da cor é facilitada em pH baixo, sendo que, quanto mais elevado o pH, mais intensa é a cor.

Para este coagulante, QCSB, o pH que teve maior remoção foi o 4,0 com cor remanescente de 44,1 e 43,3, nas concentrações de 15 e 25 mg/L, com percentual de remoção de 91,8 e 91,9% respectivamente.

Como observado, no que faz referência a remoção de cor, ocorreu uma variação considerável de pH ótimo, sendo que, cada coagulante apresentou resultados eficientes em uma faixa de pH específico, entretanto, os valores encontrados que se adequam a legislação estão próximos de pH neutro (pH 5,0-6,0).

Momeni et al. (2018) sintetizaram a quitosana com CHPTAC e utilizaram o produto para tratar água residual com cor elevada. Neste estudo, obtiveram uma eficiência máxima de remoção de 76,20% com a concentração de 1000 mg/L em pH 3,0. Este estudo evidenciou a dificuldade que a quitosana apresenta na remoção de cor em águas com turbidez elevada.

A quitosana, em dosagem de 7,5 mg/L, foi capaz de remover até 80% da cor, em estudo realizado com valores de até 50 uC para a água bruta (EIKEBROKK; SALTNES, 2002). Dado que o valor inicial de cor no presente estudo excedia 500 uC, os resultados alcançados podem ser considerados aceitáveis.

Com os floculantes do estudo, elevadas eficiências de remoção foram conseguidas, tanto para cor, como para turbidez. Porém, no sistema de tratamento proposto (coagulação/floculação/sedimentação/filtração) na maioria dos testes, o tratamento em si não foi suficientemente eficiente para atingir os valores máximos permitidos pela Portaria N° 888/2021, que trata sobre os padrões de potabilidade de água destinada para consumo humano.

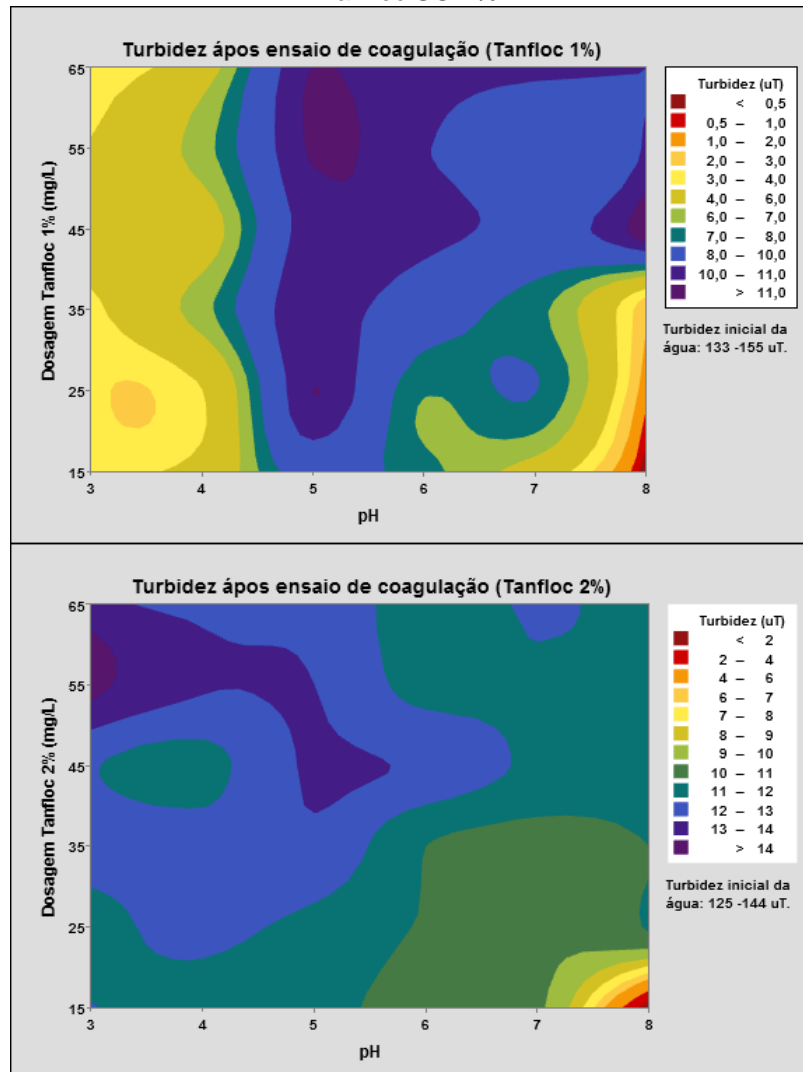
Para as quitosanas sintetizadas, as dosagens menores dos coagulantes se mostraram eficientes, evidenciando o potencial da quitosana como tratamento de águas. Entretanto, por não apresentar valores satisfatórios, em sua maioria, uma opção seria a combinação do tratamento testado com um tratamento complementar. Além disso, os experimentos desenvolvidos com uma turbidez inicial menor podem indicar resultados em conformidade aos padrões

Ainda, a fim de comparação, entre o uso do floculante cationizado no estudo, e coagulantes orgânicos disponíveis no mercado, foi testado o uso do coagulante orgânico Tanfloc SG, da empresa TANAC.

As doses e intervalos de pH idênticos aos aplicados nos testes com as quitosanas catiônicas foram empregados nos experimentos envolvendo o Tanfloc SG, nas concentrações de 1% e 2%. Da mesma maneira, o equipamento Jar test foi utilizado, mantendo os mesmos parâmetros operacionais previamente estabelecidos.

Assim como no caso das quitosanas catiônicas, levando em consideração os intervalos de pH e concentrações de floculante utilizadas, procedeu-se à elaboração de diagramas de coagulação com base nos valores finais obtidos para cor e turbidez. O diagrama correspondente à turbidez remanescente em água tratada com os coagulantes à base de Tanfloc SG encontra-se representado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de coagulação para turbidez após ensaio de coagulação com Tanfloc SG 1% e Tanfloc SG 2%.



Fonte: Autora (2023).

Para o parâmetro de turbidez, pode-se observar, que nas faixas de pH entre 3,0 a 7,0 todos os valores foram similares, especialmente com o Tanfloc SG 1%, e até mesmo superiores, com Tanfloc SG 2%, mesmas concentração dos coagulantes avaliados, aos encontrados para a quitosanas catiônicas. Somente em pH 8,0 e dosagem de 15 mg/L o valor de turbidez remanescente do tratamento com Tanfloc SG 1 e 2%, 0,08 e 0,82 uT, respectivamente, foi inferior ao valor conseguido com os tratamentos da água com quitosanas catiônicas.

Para o Tanfloc SG (1 e 2%), os melhores resultados obtidos foram com dosagem menor, de 15 mg/L, assim como os valores ótimos que foram obtidos para todas as quitosanas sintetizadas que foram testadas, demonstrando que no uso de

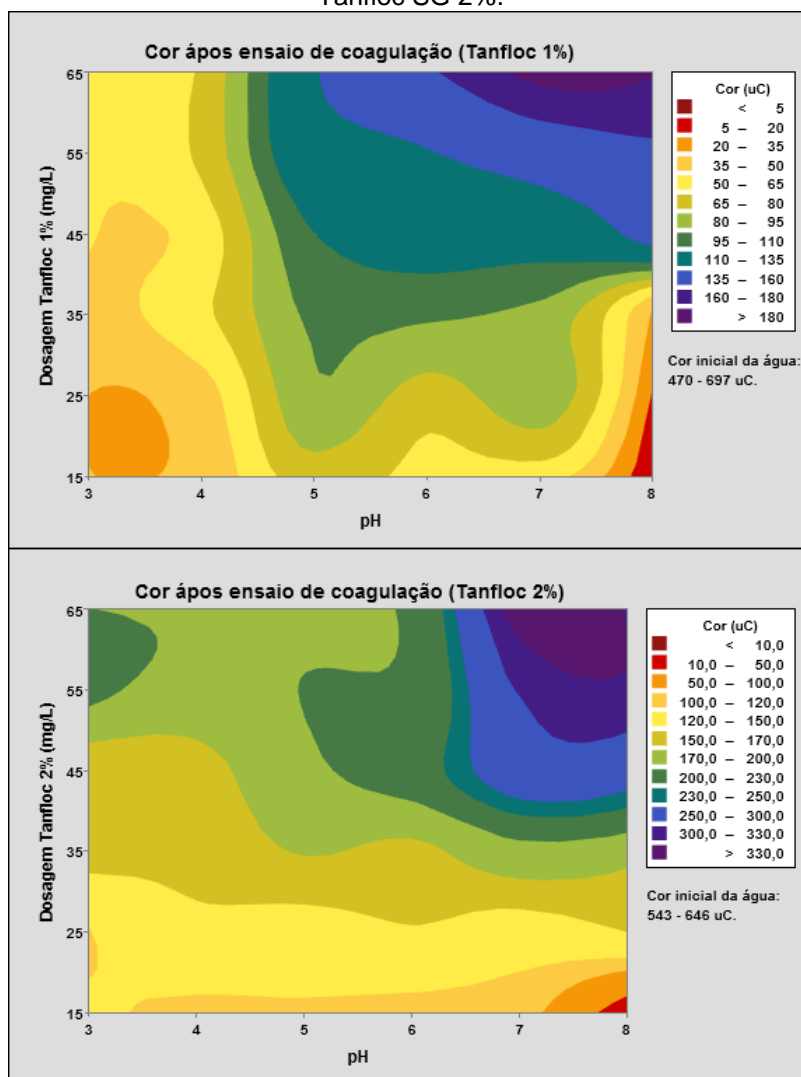
coagulantes orgânicos há uma tendência em se utilizar dosagens menores nos tratamentos. Diferente da maioria das quitosanas catiônicas, a faixa de pH que obteve melhor resultado foi em pH 8,0 a qual também foi demonstrada na QCSA.

No entanto, com exceção dos valores citados acima, os demais remanescentes na faixa de pH 3,0 a 8,0 ficaram acima do valor máximo permitido, estabelecido pela Portaria Nº 888/2021. Constata-se que, na maioria dos casos, doses menores foram eficientes na remoção de turbidez nas diferentes faixas de pH. Para o Tanfloc SG 1%, uso comercial, a eficiência de remoção alcançou 99,9% no pH 8,0 em baixa concentração (15 mg/L).

Zolett e Jabur (2013), testaram o desempenho do Tanfloc SG 1%, e obtiveram turbidez remanescente de 1,18 uT, com dosagem de 8 mg/L, próxima a melhor dosagem utilizada no presente estudo, resultado obtido em pH 8,19, também similar a este estudo. Silveira et al. (2019) também observaram que valores de pH em torno de 8,0 ou acima, indicam menores valores de turbidez remanescente no tratamento realizado com Tanfloc SG.

Quanto a cor remanescente, os resultados podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de coagulação para cor após ensaio de coagulação com Tanfloc SG 1% e Tanfloc SG 2%.



Fonte: Autora (2023).

Comparando os resultados obtidos para o tratamento com Tanfloc SG 2% e com os das quitosanas catiônicas, nas faixas de pH e concentrações testadas, os valores para o tratamento com as quitosanas catiônicas e QP foram melhores, em todas as concentrações e faixas de pH.

Ao comparar os demais coagulantes orgânicos como o Tanfloc SG 1% os valores sofreram grande variação. Entretanto, somente com a dosagem de 15 mg/L em pH 8,0 o valor obtido se enquadrou nos padrões de potabilidade, indicando que esta é a dosagem ótima do coagulante, visto que apresentou bons resultados, tanto para cor, como para turbidez.

O melhor resultado conseguido para o Tanfloc SG 1%, e o único dentro dos padrões de potabilidade elencados pela Portaria N° 888/2021, foi na faixa de pH 8,0 e com a dosagem de coagulante de 15 mg/L.

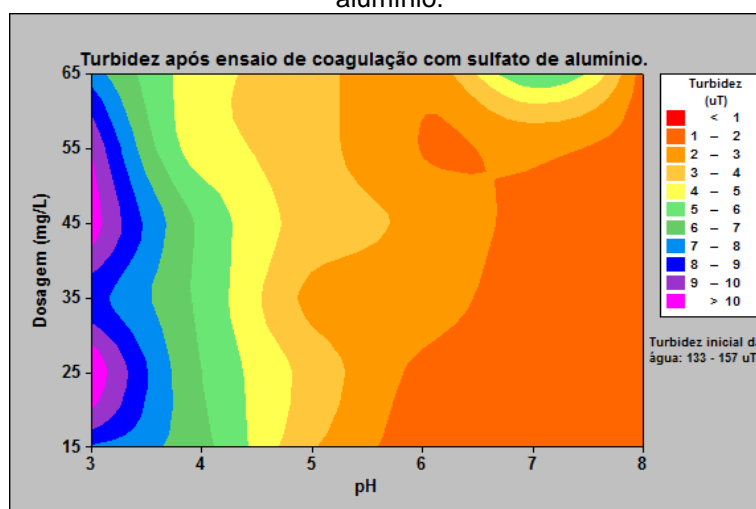
A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que para o Tanfloc SG (1 e 2%) dosagens menores foram mais eficientes para a remoção da cor. Segundo Silveira et al. (2019) coagulantes a base de tanino, quando em dosagens elevadas podem naturalmente conferir cor a água, visto que, a base do tanino apresenta elevada cor natural.

Quanto a eficiência de tratamento para remoção da cor, as dosagens maiores, apresentaram menor eficiência de tratamento, como se pode observar na faixa de pH 8,0 onde a dose de 65 mg/L removeu apenas 69,8 e 42,5% da cor, enquanto no mesmo pH, com dose de 15 mg/L, a remoção chegou a 98,9 e 69,8%, respectivamente em Tanfloc SG 1 e 2%.

Como mencionado, isso pode ser explicado devido a base do coagulante Tanfloc SG, a qual apresenta elevada cor natural e, assim, quando em maiores concentrações, ou dependendo do tempo de sedimentação, o coagulante pode conferir cor na água.

Ainda, a fim de comparação com os floculantes orgânicos anteriormente citados, foi testado o uso do coagulante inorgânico comercial Sulfato de Alumínio, em doses que variaram de 16 a 36 mg/L (Figura 12).

Figura 12 – Diagrama de coagulação para turbidez após ensaio de coagulação com sulfato de alumínio.

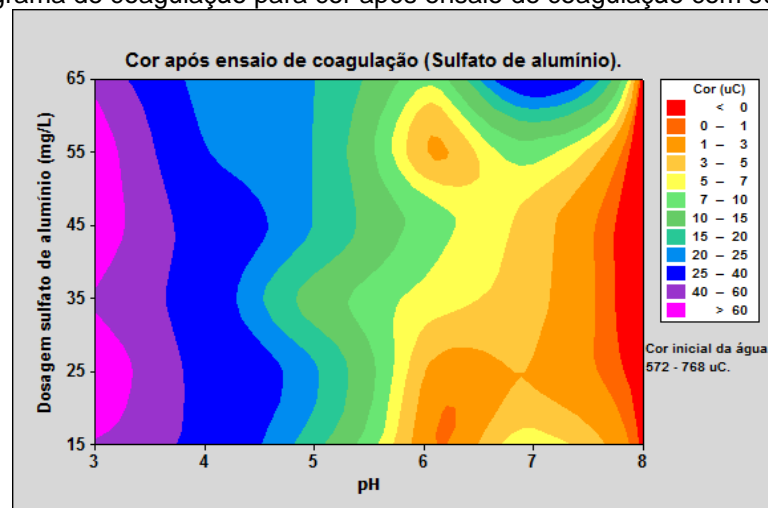


Fonte: Autora (2023).

Com as dosagens testadas, para turbidez, não foi alcançado nenhum resultado que atendesse os padrões estabelecidos pela Portaria Nº 888/2021. Entretanto, os melhores resultados foram obtidos com pH acima de 6,0, sendo que, em pH 8,0 todas as dosagens ficaram com a turbidez em torno de 1,4 NTU

Para o fator cor, todas as doses testadas em pH 8,0 obtiveram resultados aceitáveis, chegando a obter resultados que ultrapassam a eficiência de 100,1% no tratamento, como valores de uC estando dentro dos padrões organolépticos de potabilidade. Nos valores de pH menores (3,0 e 4,0) o coagulante inorgânico não atendeu o valor máximo permitido pela portaria Nº 888/2021, (Figura 13).

Figura 13 – Diagrama de coagulação para cor após ensaio de coagulação com sulfato de alumínio.



Fonte: Autora (2023).

Em estudo realizado por Rocha et al. (2020) em água de alta turbidez, com inicial de 325 a 930 NTU e cor de 48,3 a 147,94 uC, observaram que os melhores resultados para redução da turbidez foram conseguidos com dosagem de 6,75mL de sulfato de alumínio por jarro, resultou num percentual de remoção de 97%, com o valor de 17,1 NTU de turbidez remanescente. Com relação a cor, a dosagem de 6,75 mL de sulfato de alumínio por jarro, resultou num percentual de remoção de 94%, resultando em cor remanescente de 7,45 uC.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, as conclusões são as seguintes:

- A cationização da quitosana resultou em grau de substituição de 1,39; 1,03 e 0,80, respectivamente para QCSA, QCSB e QCSN.

- A dosagem de quitosana (QP, QCSA, QCSB e QCSN) que apresentou melhor resultado, tanto para remoção de cor como de turbidez, foi de 15 mg/L.

- As quitosanas sintetizadas alcançaram eficiência de remoção de 97,9% para turbidez e 97,2% para cor. No caso da QP, a eficiência de remoção foi de 98,5% para turbidez e 99,1% para cor.

- A quitosana não cationizada apresentou eficácia no tratamento da água estudada.

- Para o Tanfloc SG 1% e 2%, a dose mais eficaz testada foi de 15 mg/L, em pH 8,0.

- No caso do coagulante inorgânico sulfato de alumínio, os padrões de potabilidade não foram alcançados na remoção de turbidez, mas a eficiência na remoção de cor superou 100% em pH específico.

O estudo evidenciou a eficácia da quitosana, tanto na forma catiônica quanto não catiônica, no processo de tratamento físico-químico da água, desempenhando um papel significativo na redução de cor e turbidez. Esses resultados destacam que o uso de agentes floculantes orgânicos são uma alternativa viável à substituição dos coagulantes inorgânicos amplamente empregados.

Para trabalhos futuros, sugere-se aprimorar o processo de cationização da quitosana, especialmente em meios básicos e neutros, de modo a aumentar o DS, o que poderá melhorar a eficiência de tratamento. Da mesma forma, indica-se a combinação com tratamentos complementares, o que pode aumentar a eficiência de tratamento das quitosanas sintetizadas. Ainda, deve-se testar a aplicação das quitosanas catiônicas em estudos com outros tipos de tratamento, como para o tratamento de águas residuárias ácidas ou com turbidez inicial menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDO, S. M. et al. Cationic Starch and Polyaluminum Chloride as Coagulants for River Nile Water Treatment. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, n. November 2019, p. 11, 2020.

ALVES, K. DOS S. **Alquilação redutiva da quitosana a partir do glutaraldeído e 3-amino-1-propanol**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN., 2008.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION (EDS.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23rd ed. Washington (D.C.): American public health association, 2017.

ARANAZ, I. et al. Chitosan : An Overview of Its Properties and Applications. **Polymers**, v. 13, n. 3256, p. 27, 2021.

ARANAZ, I.; HARRIS, R.; HERAS, A. Chitosan Amphiphilic Derivatives . Chemistry and Applications. **Current Organic Chemistry**, v. 14, n. 3, p.308–330, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15448-1**: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2008.

BACCI, D. de L. C.; PATACA, E. M. Educação para a água . **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 211-226, 2008. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10302>. Acesso em: 31 ago. 2023.

BARTIKO, D.; JULIO, M. D. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. n 1, p. 71–81, 2015.

DI BERNARDO, A. S. **Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada**. Tese de Doutorado—São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2004.

BONIFÁCIO, C. M.; NÓBREGA, M. T. DE. Parâmetros De Qualidade Da Água No Monitoramento Ambiental. **Recursos Hídricos: gestão, planejamento e técnicas em pesquisa**, p. 219–232, 2021.

BOTERO, W. G. et al. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química nova**, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

BRASIL. **Manual prático de análise de água**. Fundação Nacional de Saúde — Brasília: Funasa, p. 150, ed. 4, 2013.

BRASIL. **Portaria GM/MS Nº 888**, de 4 de maio de 2021. Ministério da Saúde, Gabinete do Ministro, Brasília 2021.

DIVAKARAN, R.; PILLAI, V. N. S. Mechanism of kaolinite and titanium dioxide flocculation using chitosan — assistance by fulvic acids ? **Water Research**, v. 38, p. 2135–2143, 2004.

EIKEBROKK, B.; SALTNES, T. NOM removal from drinking water by chitosan coagulation and filtration through lightweight expanded clay aggregate filters. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 51, n. 6, p. 323–332, 2002.

FARIAS, F. A.; FERREIRA, R. L. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de fábrica de celulose não branqueada. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade** - v.5, n.3 - 2014

FELIPE, L. O. et al. Quitosana: da Química Básica à Bioengenharia. **Química e Sociedade**, v. 39, p. 312–320, 2017.

FRANCISCO, A. A.; POHLMANN, P. H. M.; FERREIRA, M. A. Tratamento convencional de águas para abastecimento humano : uma abordagem teórica dos processos envolvidos e dos indicadores de referência. **IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**, n. 1, p. 1–9, 2009.

GAO, B. Y.; HAHN, H. H.; HOFFMANN, E. Evaluation of aluminum-silicate polymer composite as a coagulant for water treatment. **Water Research**, v. 36, p. 3573–3581, 2002.

GRADE, B. T. L. **Cationização da Celulose Microcristalina e Utilização como Floculante para o Tratamento de Água**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS., 2022.

GRUŠKIENE, R.; DEVEIKYTE, R.; MAKUŠKA, R. Quaternization of chitosan and partial destruction of the quaternized derivatives making them suitable for electrospinning. **Chemija**, v. 24, n. 4, p. 325–334, 2013.

GUO, A. et al. Uncertainty analysis of water availability assessment through the Budyko framework. **Journal of Hydrology**, 2019.

HABITZREUTER, F. et al. Biopolímeros, Processamento e Aplicações. In: **Nanotecnologia Aplicada a Polímeros**. São Paulo. p. 91. 2022. ISBN: 9786555502527, DOI 10.5151/9786555502527-03

HAMDON, R. S. M. A. et al. Use of Chitosan for Enhancing the Process of Surface Water Purification in Egypt. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 13, n. 2, p. 26–34, 2022.

HOU, J. et al. Science of the Total Environment Changes in Microcystis aeruginosa cell integrity and variation in microcystin-LR and proteins during Tan flocculation and storage. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 264–273, 2018.

HUANG, M. et al. Preparation of dual-function starch-based flocculants for the simultaneous removal of turbidity and inhibition of *E. coli* in water. **Water Research**, 2016.

HUANG, P.; ZHAO, X.; YE, L. Synthesis of Hydrophobic Cationic Chitosan Flocculant and Its Sludge Dewatering Property. **Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics**, v. 55, n. 3, p. 299–309, 2016.

IBRAHIM, H. M.; EL-ZAIRY, E. M. R. Chitosan as a Biomaterial — Structure, Properties, and Electrospun Nanofibers. **Concepts, Compounds and the Alternatives of Antibacterials**, p. 29, cap. 4, 2015.

KIM, S.; MOON, B.; LEE, H. Effects of pH and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation. **Microchemical Journal**, v. 68, p. 197–203, 2001.

KIM, Y. H. et al. Synthesis of Fully Deacetylated Quaternized Chitosan with Enhanced Antimicrobial Activity and Low Cytotoxicity. **Antibiotics**, v. 11, n. 1644, p. 16, 2022.

LARANJEIRA, M. C. M.; FÁVERE, V. T. DE. Quitosana: biopolímero funcional com potencial industrial biomédico. **Química nova**, v. 32, n. 3, p. 672–678, 2009.

LEE, C. S.; ROBINSON, J.; CHONG, M. F. A review on application of flocculants in wastewater treatment. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 92, n. 6, p. 489–508, 2014.

LEME, F. P. **Teoria e Técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Rio de Janeiro: Abes, 1990.

LI, H. et al. Effect of molecular weight and degree of substitution of quaternary chitosan on its adsorption and flocculation properties for potential retention-aids in alkaline papermaking. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 242, n. 1–3, p. 1–8, 2004.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas, SP: Átomo, 3ª ed., 2010.

LIM, S. H.; HUDSON, S. M. Synthesis and antimicrobial activity of a water-soluble chitosan derivative with a fiber-reactive group. **Carbohydrate Research**, v. 339, n. 2, p. 313–319, 2004.

LIMA JÚNIOR, R. N. .; ABREU, F. O. M. S. Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Flocculantes para Tratamento de Águas : Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, p. 27, 2018.

LIN, Z. et al. Histatin1-modified thiolated chitosan hydrogels enhance wound healing by accelerating cell adhesion, migration and angiogenesis. **Carbohydrate Polymers**, 2019.

LU, Y. et al. Preparation of quaternary ammonium salt of chitosan nanoparticles and their textile properties on *Antheraea pernyi* silk modification. **Textile Research Journal**, v. 84, n. 19, p. 2115–2124, 2014.

MADERA-SANTANA, T. J.; HERRERA-MÉNDEZ, C. H.; RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, J. R. An overview of the chemical modifications of chitosan and their advantages. **Green Materials**, v. 6 (4), p. 131–142, 2018.

MAO, S. et al. Effects of citronellol grafted chitosan oligosaccharide derivatives on regulating anti-inflammatory activity. **Carbohydrate Polymers**, v. 262, p. 12, 2021.

MICHELAN, D. C. DE G. S. et al. Uso do coagulante/floculante emergente à base de moringa no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido : tratamento de água com Moringa e toxicidade do lodo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 955–963, 2021.

MOMENI, M. M. et al. Using Chitosan/CHPATC as coagulant to remove color and turbidity of industrial wastewater : Optimization through RSM design. **Journal of Environmental Management**, v. 211, p. 347–355, 2018.

MOSQUEIRA, C. V. C.; CARLOS, L. F. C.; HILARES, S. A. M. **Eficiencia del quitosano extraído del choro (aulacomya atra molina) como coagulante natural para la reducción de la turbidez del agua proveniente del río Chillón**. 2023. Tesis (título profesional de ingeniero químico) - Universidad Nacional del Callao, Callao, Peru, 2023.

MU, X. et al. Theoretical study of the reaction of chitosan monomer with 2,3-epoxypropyl-trimethyl quaternary ammonium chloride catalyzed by an imidazolium-based ionic liquid. **Carbohydrate Polymers**, v. 146, p. 46–51, 2016.

MUÑOZ, F. L. et al. A bibliometric study of Chitosan Applications : Insights from processes. **Revista Ion**, v. 36, n. 1, p. 59–78, 2023.

NEENAZ, S. **Comparison of different cationizing agents on cotton**. 2015. Dissertation (Master of Science) - North Carolina State University, Raleigh, 2015.

NOOR, A. M. et al. Preparation of Quaternized Lignin Derived from Oil Palm Empty Fruit Bunches and its Flocculation Properties. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–22, 2019.

PANDA, P. K. et al. Improvement of chitosan water solubility by fumaric acid modification. **Materials Letters**, v. 316, 2022.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PEI, L. M. et al. New insights into chitosan-DNA interactions using isothermal titration microcalorimetry. **Biomacromolecules**, v. 10, n. 6, p. 1490–1499, 2009.

- PENG, Z. X. et al. Adjustment of the antibacterial activity and biocompatibility of hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride chitosan by varying the degree of substitution of quaternary ammonium. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, n. 2, p. 275–283, 2010.
- PONTIUS, F. W. Chitosan as a Drinking Water Treatment Coagulant Chitosan as a Drinking Water Treatment Coagulant. **American Journal of Civil Engineering**. v. 4, n. 5, p. 205-215, 2016.
- PRADO, H. J.; MATULEWICZ, M. C. Cationization of polysaccharides: A path to greener derivatives with many industrial applications. **European Polymer Journal**, v. 52, n. 1, p. 53–75, 2014.
- RABIEE, A.; ERSHAD-LANGROUDI, A.; ZEYNALI, M. E. A survey on cationic polyelectrolytes and their applications : acrylamide derivatives. **Rev Chem Eng**, v. 31, n. 3, p. 239–261, 2015.
- RINAUDO, M. .; PAVLOV, G. .; DESBRIÈRES, J. Solubilization of Chitosan in Strong Acid Medium. **Int. J. Polym. Anal. Charact.**, v. 5, p. 267–276, 1999.
- RITTER, C. M. **Estudo da utilização de polímeros naturais *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench (Malvaceae) e *Moringa oleifera* LAM (Moringaceae) No tratamento de água de abastecimento**. 2013. TCC (Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, PR, 2013.
- ROCHA, V. V. F. et al. Clarification of high-turbidity waters: a comparison of *Moringa oleifera* and virgin and recovered aluminum sulfate-based coagulants. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, n. 5, p. 4551–4562, 2020.
- SARTOR, D. **Preparação de Polímeros Catiônicos Orgânicos a Partir do Amido de Milho e da Fécula de Batata para Utilização no Tratamento de Água**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS., 2021.
- SEONG, H.; WHANG, H. S. U. K.; KO, S. Synthesis of a Quaternary Ammonium Derivative of Chito- oligosaccharide as Antimicrobial Agent for Cellulosic Fibers. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 76, n. 14, p. 2009–2015, 2000.
- SILVA, F. A. DA; RABELO, D. O Uso Sustentável de Polímeros. **Revista Processos Químicos/SENAI**, v. 21, n. 11, p. 100, 2017.
- SILVEIRA, T. N. et al. Performance de coagulantes orgânicos e inorgânicos por meio de diagrama de coagulação em águas naturais. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**. v. 7, n. 1, p. 16–25, 2019.
- SONG, H. et al. Homogeneous Synthesis of Cationic Chitosan via New Avenue. **Molecules**, v. 23 (8), 2018.
- SPINELLI, V. A. **Quitosana, polieletrólito natural para o tratamento de água**

potável. 2001. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, p. 146, 2001.

SPINELLI, V. A.; LARANJEIRA, M. C. M.; FÁVERE, V. T. Preparation and characterization of quaternary chitosan salt: Adsorption equilibrium of chromium(VI) ion. **Reactive and Functional Polymers**, v. 61, n. 3, p. 347–352, 2004.

STRAND, S. P. et al. Screening of Chitosans and Conditions for Bacterial Flocculation. **Biomacromolecules**, v. 2, n. 1, p.126–133, 2001.

TEJADA, L. S. **Síntese e Desempenho da Lignina Catiônica como Floculante para o Tratamento de Águas Residuárias**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS., 2022.

VALVERDE, K. C. et al. Coagulation diagram using the Moringa oleifera Lam and the aluminium sulphate, aiming the removal of color and turbidity of water. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 5, n. 3, p. 485–489, 2013.

VALVERDE, K. C. et al. Optimization of process conditions in water treatment through coagulation diagrams, using Moringa oleifera Lam and aluminium sulphate. **Desalination and Water Treatment**. p.1-6, 2014.

VERÍSSIMO, A. M. B. R. **Uso de polieletrólitos baseados em celulose no tratamento de efluentes industriais**. 2018. Dissertação (mestrado) - Universidade de Coimbra, Coimbra, p. 144, 2018.

VISENTINI, F.; RODRIGO, C.; RHODEN, B. Quitosana como coagulante no tratamento de água para abastecimento. **Disciplinarum Scientia**. v. 21, n. 2, p. 75–89, 2020.

WANG, W. et al. Determination of the Mark-Houwink equation for chitosans with different degrees of deacetylation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 13, n. 5, p. 281–285, 1991.

WANG, X. et al. Preparation and Evaluation of Titanium-Based Xerogel as a Promising Coagulant for Water/Wastewater Treatment. **Environmental Science & Technology**. v. 50, p. 9619-9626. 2016.

YANG, Z. et al. Removing specific extracellular organic matter from algal bloom water by Tanfloc flocculation : Performance and mechanisms. **Separation and Purification Technology**, v. 212, p. 65–74, 2019.

YAO, M.; NAN, J.; CHEN, T. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. **Desalination**, v. 354, p. 116–124, 2014.

YOUNES, I.; RINAUDO, M. Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications. **Marine Drugs**, v. 13, n. 1133–1174, p. 42, 2015.

YU, C.; KECEN, X.; XIAOSAI, Q. Grafting Modification of Chitosan. In: **Biopolymer Grafting: Synthesis and Properties**. p. 295–364. 2018.

ZHANG, Q. et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin , China. **Hydrological Processes**. 2016.

ZOLETT, E. R.; JABUR, A. S. Uso de polímero natural a base de tanino (tanfloc) para o tratamento de água para o consumo humano. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. p. 1–8. 2013. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP013013.pdf. Acesso em: 31 de agosto de 2023.

**APÊNDICE A – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA
CATIONIZADA EM SOLUÇÃO ÁCIDA (QCSA)**

QCSA (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	uC t=0	uC t=20	uC final	Remoção (%)
pH3									
15	26	7,35	3,17	17	641,2	388,18	324,51	51,5	92,0
25	26	7,35	3,17	17	641,2	435,16	391,74	63,8	90,0
35	26	7,35	3,17	17	641,2	458,40	415,72	72,8	88,6
45	26	7,35	3,17	17	641,2	483,77	458,35	65,7	89,7
55	26	7,35	3,17	17	641,2	498,56	459,37	65,8	89,7
65	26	7,35	3,17	17	641,2	506,66	473,06	62,4	90,3
pH4									
15	26	7,35	4	17	683,28	479,00	388,26	65,0	90,5
25	26	7,35	4	17	683,28	517,92	477,31	60,7	91,1
35	26	7,35	4	17	683,28	528,84	495,48	66,8	90,2
45	26	7,35	4	17	683,28	540,22	500,63	67,1	90,2
55	26	7,35	4	17	683,28	544,62	514,54	67,0	90,2
65	26	7,35	4	17	683,28	564,43	532,71	83,6	87,7
pH 5									
15	26	7,35	5,36	17	685,91	506,49	451,49	58,2	91,5
25	26	7,35	5,36	17	685,91	526,82	497,54	69,5	89,9
35	26	7,35	5,36	17	685,91	543,25	504,88	81,5	88,1
45	26	7,35	5,36	17	685,91	557,67	526,42	85,6	87,5
55	26	7,35	5,36	17	685,91	558,46	533,96	81,5	88,1
65	26	7,35	5,36	17	685,91	545,81	538,06	85,2	87,6
pH 6									
15	26	7,37	6	18	637,4	478,88	416,25	52,8	91,7
25	26	7,37	6	18	637,4	500,95	467,05	73,7	88,4
35	26	7,37	6	18	637,4	533,17	492,18	74,6	88,3
45	26	7,37	6	18	637,4	563,29	499,41	72,3	88,6
55	26	7,37	6	18	637,4	556,92	518,17	85,4	86,6
65	26	7,37	6	18	637,4	552,87	529,83	91,8	85,6
pH 7									
15	26	7,37	7,36	18	605,76	356,17	289,69	40,2	93,3
25	26	7,37	7,36	18	605,76	438,99	409,49	46,3	92,3
35	26	7,37	7,36	18	605,76	478,06	426,29	72,4	88,0
45	26	7,37	7,36	18	605,76	495,83	462,65	65,1	89,2
55	26	7,37	7,36	18	605,76	508,50	469,76	70,5	88,4
65	26	7,37	7,36	18	605,76	522,40	493,00	65,3	89,2
pH8									
15	26	7,37	8,29	18	659,92	303,36	253,35	18,2	97,2
25	26	7,37	8,29	18	659,92	446,12	410,82	50,6	92,3
35	26	7,37	8,29	18	659,92	501,82	454,12	68,0	89,7
45	26	7,37	8,29	18	659,92	537,86	500,40	65,0	90,1
55	26	7,37	8,29	18	659,92	564,92	516,93	78,3	88,1
65	26	7,37	8,29	18	659,92	571,66	544,32	83,4	87,4

Fonte: Autora (2023).

**APÊNDICE B – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA
CATIONIZADA EM SOLUÇÃO BÁSICA (QCSB)**

QCSB (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	t=0 (uC)	t=20 (uC)	uC final	Remoção (%)
pH3									
15	25	7,35	3,29	20	644,8	560,48	451,12	74,2	88,5
25	25	7,35	3,29	20	644,8	600,24	549,96	72,7	88,7
35	25	7,35	3,29	20	644,8	610,23	551,63	74,4	88,5
45	25	7,35	3,29	20	644,8	600,94	570,84	83,0	87,1
55	25	7,35	3,29	20	644,8	609,76	557,17	81,6	87,3
65	25	7,35	3,29	20	644,8	594,60	557,05	85,8	86,7
pH4									
15	26	7,38	4,14	17,6	536,9	402,85	322,02	44,1	91,8
25	26	7,38	4,14	17,6	536,9	430,64	394,27	43,3	91,9
35	26	7,38	4,14	17,6	536,9	434,71	403,57	55,4	89,7
45	26	7,38	4,14	17,6	536,9	447,66	393,53	59,5	88,9
55	26	7,38	4,14	17,6	536,9	438,49	412,54	58,5	89,1
65	26	7,38	4,14	17,6	536,9	466,50	438,61	71,7	86,6
pH5									
15	26	7,38	5,40	17,7	570,5	424,8	357,62	49,4	91,3
25	26	7,38	5,40	17,7	570,5	434,9	413,51	53,5	90,6
35	26	7,38	5,40	17,7	570,5	435,9	406,11	58,9	89,7
45	26	7,38	5,40	17,7	570,5	426,2	399,87	59,6	89,5
55	26	7,38	5,40	17,7	570,5	435,8	381,33	67,4	88,2
65	26	7,38	5,40	17,7	570,5	440,1	417,49	70,9	87,6
pH6									
15	26	7,38	6,19	17,7	556,9	465,38	392,29	63,2	88,6
25	26	7,38	6,19	17,7	556,9	496,65	458,72	70,2	87,4
35	26	7,38	6,19	17,7	556,9	498,51	462,28	84,5	84,8
45	26	7,38	6,19	17,7	556,9	506,22	491,73	84,9	84,7
55	26	7,38	6,19	17,7	556,9	512,23	498,22	90,8	83,7
65	26	7,38	6,19	17,7	556,9	513,65	474,48	87,1	84,3
pH7									
15	26	7,38	7,38	17,5	609,73	562,36	487,45	89,46	85,3
25	26	7,38	7,38	17,5	609,73	559,06	551,25	94,43	84,5
35	26	7,38	7,38	17,5	609,73	561,89	526,30	114,4	81,2
45	26	7,38	7,38	17,5	609,73	567,88	546,28	117,9	80,6
55	26	7,38	7,38	17,5	609,73	576,06	545,31	131,6	78,4
65	26	7,38	7,38	17,5	609,73	576,46	546,63	117,9	80,6
pH8									
15	25	7,35	8,19	20	606,31	538,16	513,53	105,8	82,5
25	25	7,35	8,19	20	606,31	541,96	527,44	115,5	80,9
35	25	7,35	8,19	20	606,31	529,26	527,37	135,3	77,7
45	25	7,35	8,19	20	606,31	537,44	513,35	142,0	76,6
55	25	7,35	8,19	20	606,31	536,96	521,21	136,5	77,5
65	25	7,35	8,19	20	606,31	535,37	523,14	144,8	76,1

Fonte: Autora (2023).

**APÊNDICE C – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA
CATIONIZADA EM SOLUÇÃO NEUTRA (QCSN)**

QCSN (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	t=0 (uC)	t=20 (uC)	uC final	Remoção (%)
pH 3									
15	26	7,47	3,29	17,6	692,77	328,6	222,9	33,3	95,2
25	26	7,47	3,29	17,6	692,77	351,9	269,3	37,8	94,5
35	26	7,47	3,29	17,6	692,77	372,5	314,4	43,2	93,8
45	26	7,47	3,29	17,6	692,77	409,3	339,0	40,1	94,2
55	26	7,47	3,29	17,6	692,77	380,6	311,7	49,1	92,9
65	26	7,47	3,29	17,6	692,77	418,7	365,5	43,4	93,7
pH 4									
15	26	7,28	4	18	592,93	402,0	340,5	56,5	90,5
25	26	7,28	4	18	592,93	437,2	408,2	49,0	91,7
35	26	7,28	4	18	592,93	466,9	428,2	55,8	90,6
45	26	7,28	4	18	592,93	439,6	413,5	61,9	89,5
55	26	7,28	4	18	592,93	476,2	441,3	59,6	89,9
65	26	7,28	4	18	592,93	472,2	452,7	58,3	90,2
pH 5									
15	26	7,28	5,47	18	595,1	527,4	472,5	77,63	86,9
25	26	7,28	5,47	18	595,1	551,8	515,8	78,90	86,7
35	26	7,28	5,47	18	595,1	569,7	551,8	97,56	83,6
45	26	7,28	5,47	18	595,1	585,6	541,9	100,2	83,1
55	26	7,28	5,47	18	595,1	594,0	551,0	91,79	84,6
65	26	7,28	5,47	18	595,1	575,0	556,7	94,26	84,2
pH 6									
15	26	7,47	6,09	17,6	662,2	554,5	486,8	77,65	88,3
25	26	7,47	6,09	17,6	662,2	573,2	508,6	78,92	88,1
35	26	7,47	6,09	17,6	662,2	575,8	520,5	100,6	84,8
45	26	7,47	6,09	17,6	662,2	566,2	548,4	100,9	84,8
55	26	7,47	6,09	17,6	662,2	571,0	564,5	106,3	83,9
65	26	7,47	6,09	17,6	662,2	555,6	555,8	107,6	83,7
pH 7									
15	25	7,19	7,33	18	759,7	593,0	515,8	132,4	82,6
25	25	7,19	7,33	18	759,7	665,6	620,8	203,6	73,2
35	25	7,19	7,33	18	759,7	688,6	636,5	207,2	72,7
45	25	7,19	7,33	18	759,7	680,1	659,7	222,7	70,7
55	25	7,19	7,33	18	759,7	684,9	658,3	177,7	76,6
65	25	7,19	7,33	18	759,7	676,3	662,1	165,7	78,2
pH 8									
15	26	7,28	8,27	18	713,0	565,8	496,2	73,7	89,6
25	26	7,28	8,27	18	713,0	631,7	595,8	79,6	88,8
35	26	7,28	8,27	18	713,0	652,9	600,9	82,8	88,4
45	26	7,28	8,27	18	713,0	666,4	621,7	95,3	86,6
55	26	7,28	8,27	18	713,0	661,5	611,0	93,1	86,9
65	26	7,28	8,27	18	713,0	676,5	647,4	82,0	88,5

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE D – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA NÃO ADULTERADA (QP)

QP (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	t=0 (uC)	t=20 (uC)	uC final	Remoção (%)
pH 3									
15	25,5	7,24	3,41	18	607,5	270,2	202,3	53,1	91,2
25	25,5	7,24	3,41	18	607,5	319,5	244,8	62,9	89,6
35	25,5	7,24	3,41	18	607,5	318,0	239,7	61,8	89,8
45	25,5	7,24	3,41	18	607,5	372,7	282,0	71,8	88,2
55	25,5	7,24	3,41	18	607,5	384,3	285,8	70,0	88,5
65	25,5	7,24	3,41	18	607,5	437,7	336,6	76,9	87,3
pH 4									
15	27	7,12	4	17,6	643,6	231,6	188,6	53,3	91,7
25	27	7,12	4	17,6	643,6	287,7	246,0	62,8	90,2
35	27	7,12	4	17,6	643,6	332,4	278,9	67,8	89,5
45	27	7,12	4	17,6	643,6	378,2	312,5	86,1	86,6
55	27	7,12	4	17,6	643,6	381,0	327,9	69,3	89,2
65	27	7,12	4	17,6	643,6	385,3	344,2	73,0	88,6
pH 5									
15	26	7,24	5,27	18	605,5	153,2	126,2	5,60	99,1
25	26	7,24	5,27	18	605,5	166,2	133,9	17,3	97,1
35	26	7,24	5,27	18	605,5	184,1	160,1	41,2	93,2
45	26	7,24	5,27	18	605,5	215,9	184,6	44,6	92,6
55	26	7,24	5,27	18	605,5	179,7	150,1	24,5	95,9
65	26	7,24	5,27	18	605,5	273,9	228,6	54,9	90,9
pH 6									
15	27	7,12	6,24	17,6	627,5	237,9	206,4	33,7	94,6
25	27	7,12	6,24	17,6	627,5	178,2	152,7	18,2	97,0
35	27	7,12	6,24	17,6	627,5	149,4	123,2	14,6	97,7
45	27	7,12	6,24	17,6	627,5	138,9	121,6	10,4	98,3
55	27	7,12	6,24	17,6	627,5	142,8	117,7	10,8	98,3
65	27	7,12	6,24	17,6	627,5	148,1	122,5	12,3	98,0
pH 7									
15	27	7,12	7,36	17,6	619,8	549,7	491,9	66,3	89,3
25	27	7,12	7,36	17,6	619,8	472,8	424,8	50,1	91,9
35	27	7,12	7,36	17,6	619,8	381,1	319,3	40,2	93,5
45	27	7,12	7,36	17,6	619,8	341,3	284,4	41,8	93,3
55	27	7,12	7,36	17,6	619,8	285,8	246,6	41,8	93,2
65	27	7,12	7,36	17,6	619,8	278,0	233,0	31,1	94,9
pH 8									
15	27	7,12	8	17,6	701,9	702,9	663,8	118,3	83,1
25	27	7,12	8	17,6	701,9	679,8	648,4	92,96	86,7
35	27	7,12	8	17,6	701,9	658,9	634,4	78,43	88,8
45	27	7,12	8	17,6	701,9	647,9	614,1	92,59	86,8
55	27	7,12	8	17,6	701,9	640,6	608,4	91,80	86,9
65	27	7,12	8	17,6	701,9	626,7	622,7	94,08	86,6

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE E – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 1%

Tanfloc 1% (mg/L)	Alcalinidad e	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	uC t=0	uC t=20	uC final	Remoção (%)
pH 3									
15	26	7,48	3	23	470	423,4	265	35,5	92,4
25	26	7,48	3	23	470	483,7	329,3	35,0	92,5
35	26	7,48	3	23	470	504,3	373,3	42,4	90,9
45	26	7,48	3	23	470	494,9	401,1	51,3	89,1
55	26	7,48	3	23	470	543,3	404,8	52,1	89,9
65	26	7,48	3	23	470	555,1	433,4	53,6	88,6
pH 4									
15	25	7,27	4	25	645,8	402,2	278,6	39,5	93,9
25	25	7,27	4	25	645,8	465,8	337,2	43,9	93,2
35	25	7,27	4	25	645,8	511,4	380,7	61,9	90,4
45	25	7,27	4	25	645,8	524,4	406,7	56,9	91,2
55	25	7,27	4	25	645,8	530,8	435	68,4	89,4
65	25	7,27	4	25	645,8	542,9	460,6	67,6	89,5
pH 5									
15	25	7,27	5,32	25	611,5	604,8	578,1	71,76	88,3
25	25	7,27	5,32	25	611,5	610,9	594,3	92,89	84,8
35	25	7,27	5,32	25	611,5	618,3	591,5	97,49	84,0
45	25	7,27	5,32	25	611,5	613,9	590,2	109,9	82,0
55	25	7,27	5,32	25	611,5	624,3	612,5	127,3	79,2
65	25	7,27	5,32	25	611,5	614,2	600,4	133,9	78,0
pH 6									
15	25	7,27	6,42	25	696,3	721,5	676,57	61,25	91,2
25	25	7,27	6,42	25	696,3	725,3	703,48	72,98	89,5
35	25	7,27	6,42	25	696,3	751,4	718,67	97,46	86,0
45	25	7,27	6,42	25	696,3	771,7	744,17	122,0	82,5
55	25	7,27	6,42	25	696,3	786,4	769,35	134,0	80,7
65	25	7,27	6,42	25	696,3	785,1	777,87	157,1	77,4
pH 7									
15	26	7,48	7	23	613	652,49	599,45	56,16	90,8
25	26	7,48	7	23	613	675,10	653,95	89,63	85,4
35	26	7,48	7	23	613	681,32	677,64	90,03	85,3
45	26	7,48	7	23	613	711,34	695,41	120,6	80,3
55	26	7,48	7	23	613	734,75	718,55	145,5	76,3
65	26	7,48	7	23	613	760,00	740,17	188,5	69,2
pH 8									
15	26	7,48	8,17	23	603,95	148,84	91,08	6,01	98,9
25	26	7,48	8,17	23	603,95	664,14	573,28	18,03	97,0
35	26	7,48	8,17	23	603,95	745,09	734,73	32,91	94,5
45	26	7,48	8,17	23	603,95	768,06	753,67	144,3	76,1
55	26	7,48	8,17	23	603,95	783,92	780,19	155,6	74,2
65	26	7,48	8,17	23	603,95	818,36	800,79	182,0	69,8

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE F – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 2%

Tanfloc 2% (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	t=0 (uC)	t=20 (uC)	uC final	Remoção (%)
pH 3									
15	28	7,38	3,44	17,7	627,3	614,3	554,3	132,4	78,9
25	28	7,38	3,44	17,7	627,3	617,3	588,5	119,1	81,0
35	28	7,38	3,44	17,7	627,3	612,8	590,3	159,3	74,6
45	28	7,38	3,44	17,7	627,3	622,4	593,2	153,5	75,5
55	28	7,38	3,44	17,7	627,3	620,0	614,1	208,3	66,8
65	28	7,38	3,44	17,7	627,3	618,8	593,3	200,7	68,0
pH 4									
15	28	7,35	4,12	20	621,1	601,7	583	109,9	82,3
25	28	7,35	4,12	20	621,1	618,5	598,8	144,9	76,7
35	28	7,35	4,12	20	621,1	613	612,6	155,6	74,9
45	28	7,35	4,12	20	621,1	631,3	618,1	160	74,2
55	28	7,35	4,12	20	621,1	630,9	623,7	191,5	69,2
65	28	7,35	4,12	20	621,1	648,2	632	194	68,8
pH 5									
15	28	7,35	5,14	20	617	669,1	643,1	116,5	81,1
25	28	7,35	5,14	20	617	669,1	656,1	139,6	77,4
35	28	7,35	5,14	20	617	683,9	658,5	171,7	72,4
45	28	7,35	5,14	20	617	683,	670,2	193,6	68,6
55	28	7,35	5,14	20	617	687,1	676,3	200,5	67,5
65	28	7,35	5,14	20	617	698,4	680	191,9	68,9
pH 6									
15	28	7,38	6,11	17,7	621,9	650,7	635,4	108,4	82,6
25	28	7,38	6,11	17,7	621,9	665,7	667,1	147,8	76,2
35	28	7,38	6,11	17,7	621,9	674,6	658,8	163,9	73,6
45	28	7,38	6,11	17,7	621,9	674,1	667	215,0	65,4
55	28	7,38	6,11	17,7	621,9	665,6	676,6	202,2	67,5
65	28	7,38	6,11	17,7	621,9	681,2	670,5	203,1	67,3
pH 7									
15	28	7,38	7,27	17,7	645,43	742,36	709,25	106,8	83,4
25	28	7,38	7,27	17,7	645,43	795,85	773,83	137,7	78,7
35	28	7,38	7,27	17,7	645,43	812,35	811,50	190,5	70,5
45	28	7,38	7,27	17,7	645,43	843,04	835,46	276,8	57,1
55	28	7,38	7,27	17,7	645,43	865,41	882,29	303,1	53,0
65	28	7,38	7,27	17,7	645,43	885,32	902,15	348,4	46,0
pH 8									
15	28	7,35	8,22	20	563,96	723,3	694,61	12,86	97,7
25	28	7,35	8,22	20	563,96	768,6	769,29	150,5	73,3
35	28	7,35	8,22	20	563,96	803,2	801,36	180,5	68,0
45	28	7,35	8,22	20	563,96	826,5	831,16	269,6	52,2
55	28	7,35	8,22	20	563,96	856,9	866,68	323,3	42,7
65	28	7,35	8,22	20	563,96	874,96	893,85	324,2	42,5

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE G – RESULTADOS PARA COR EM ÁGUA TRATADA COM SULFATO DE ALUMÍNIO

S.A (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	uC inicial	t=0 (uC)	t=20 (uC)	uC final	Remoção (%)
pH 3									
15	25	7,19	3,36	18	724,94	591,59	486,21	56,4	92,2
25	25	7,19	3,36	18	724,94	560,10	440,28	77,8	89,3
35	25	7,19	3,36	18	724,94	533,83	383,79	58,3	91,9
45	25	7,19	3,36	18	724,94	527,84	369,59	73,1	89,9
55	25	7,19	3,36	18	724,94	491,26	354,85	72,3	89,9
65	25	7,19	3,36	18	724,94	472,21	356,30	51,9	92,8
pH 4									
15	28	7,25	4	17,6	592,39	300,52	203,49	34,6	94,1
25	28	7,25	4	17,6	592,39	268,88	188,50	35,1	94,1
35	28	7,25	4	17,6	592,39	256,18	183,01	31,2	94,7
45	28	7,25	4	17,6	592,39	251,16	184,23	33,0	94,4
55	28	7,25	4	17,6	592,39	230,71	163,75	25,5	95,7
65	28	7,25	4	17,6	592,39	219,52	166,83	22,1	96,2
pH 5									
15	28	7,25	5,40	17,6	584,04	149,56	113,77	16,4	97,2
25	28	7,25	5,40	17,6	584,04	145,41	110,79	20,5	96,5
35	28	7,25	5,40	17,6	584,04	140,11	106,34	12,8	97,8
45	28	7,25	5,40	17,6	584,04	142,05	111,71	19,7	96,6
55	28	7,25	5,40	17,6	584,04	138,87	109,94	19,7	96,6
65	28	7,25	5,40	17,6	584,04	143,84	112,85	20,0	96,6
pH 6									
15	28	7,25	6,40	17,6	572,23	105,42	62,52	1,70	99,7
25	28	7,25	6,40	17,6	572,23	142,05	86,08	3,09	99,4
35	28	7,25	6,40	17,6	572,23	179,66	111,5	6,17	98,9
45	28	7,25	6,40	17,6	572,23	214,88	145,6	8,53	98,5
55	28	7,25	6,40	17,6	572,23	228,57	157,3	3,19	99,4
65	28	7,25	6,40	17,6	572,23	236,37	167,3	7,74	98,6
pH 7									
15	25	7,19	7,19	18	767,96	63,44	35,80	6,14	99,2
25	25	7,19	7,19	18	767,96	69,45	38,80	2,84	99,6
35	25	7,19	7,19	18	767,96	97,94	54,19	3,64	99,4
45	25	7,19	7,19	18	767,96	203,76	115,2	4,04	99,5
55	25	7,19	7,19	18	767,96	394,67	272,0	8,04	98,9
65	25	7,19	7,19	18	767,96	519,84	391,91	33,0	95,7
pH 8									
15	28	7,25	8,15	17,6	595,17	37,61	10,6	-0,36	100,1
25	28	7,25	8,15	17,6	595,17	50,54	6,84	-0,81	100,1
35	28	7,25	8,15	17,6	595,17	79,05	5,30	-1,53	100,2
45	28	7,25	8,15	17,6	595,17	90,33	6,57	-1,48	100,2
55	28	7,25	8,15	17,6	595,17	102,3	6,25	-2,10	100,3
65	28	7,25	8,15	17,6	595,17	128,3	8,73	-1,28	100,2

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE H – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA CATIONIZADA EM SOLUÇÃO ÁCIDA (QCSA)

QCSA (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	26	7,35	3,17	17	135,33	66,53	55,20	7,40	94,5
25	26	7,35	3,17	17	135,33	73,87	60,97	8,78	93,5
35	26	7,35	3,17	17	135,33	74,40	72,43	9,45	93,0
45	26	7,35	3,17	17	135,33	82,73	73,30	9,22	93,2
55	26	7,35	3,17	17	135,33	78,73	77,60	8,95	93,4
65	26	7,35	3,17	17	135,33	89,77	79,50	8,22	93,9
pH 4									
15	26	7,35	4	17	134,33	82,70	67,67	9,17	93,2
25	26	7,35	4	17	134,33	89,70	83,17	8,10	94,0
35	26	7,35	4	17	134,33	94,37	94,70	8,92	93,4
45	26	7,35	4	17	134,33	98,90	87,43	9,77	92,7
55	26	7,35	4	17	134,33	99,10	92,60	9,34	93,0
65	26	7,35	4	17	134,33	101,27	98,57	10,7	92,0
pH 5									
15	26	7,35	5,36	17	135	92,80	75,93	7,66	94,3
25	26	7,35	5,36	17	135	91,67	90,23	9,29	93,1
35	26	7,35	5,36	17	135	96,03	89,23	10,6	92,2
45	26	7,35	5,36	17	135	96,00	96,60	10,8	92,0
55	26	7,35	5,36	17	135	97,23	91,97	10,7	92,1
65	26	7,35	5,36	17	135	96,87	87,10	10,7	92,0
pH 6									
15	26	7,37	6	18	143,3	87,4	70,2	7,39	94,8
25	26	7,37	6	18	143,3	87,9	77,7	10,6	92,6
35	26	7,37	6	18	143,3	91,2	83,7	10,0	93,0
45	26	7,37	6	18	143,3	99,5	83,9	10,2	92,9
55	26	7,37	6	18	143,3	100,7	84,4	10,9	92,4
65	26	7,37	6	18	143,3	98,0	90,9	11,5	91,9
pH 7									
15	26	7,37	7,36	18	137,5	58,3	19,3	5,63	95,9
25	26	7,37	7,36	18	137,5	77,5	71,5	6,60	95,2
35	26	7,37	7,36	18	137,5	81,4	73,1	9,60	93,0
45	26	7,37	7,36	18	137,5	87,2	86,9	8,63	93,7
55	26	7,37	7,36	18	137,5	86,3	80,0	9,78	92,9
65	26	7,37	7,36	18	137,5	92,1	89,0	8,04	94,1
pH 8									
15	26	7,37	8,29	18	136,7	50,8	17,5	2,75	97,9
25	26	7,37	8,29	18	136,7	73,7	69,7	6,79	95,0
35	26	7,37	8,29	18	136,7	87,0	70,6	9,27	93,2
45	26	7,37	8,29	18	136,7	95,0	82,7	8,80	93,5
55	26	7,37	8,29	18	136,7	97,1	84,7	10,4	92,4
65	26	7,37	8,29	18	136,7	97,8	88,7	10,3	92,5

Fonte: Autora (2023).

**APÊNDICE I – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA
CATIONIZADA EM SOLUÇÃO BÁSICA (QCSB)**

QCSB (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	25	7,35	3,29	20	136,33	104,43	76,97	9,71	92,9
25	25	7,35	3,29	20	136,33	114,67	96,50	9,64	92,9
35	25	7,35	3,29	20	136,33	113,00	100,47	9,92	92,7
45	25	7,35	3,29	20	136,33	118,00	103,60	10,6	92,2
55	25	7,35	3,29	20	136,33	114,67	104,63	10,4	92,4
65	25	7,35	3,29	20	136,33	114,33	108,00	11,5	91,5
pH 4									
15	26	7,38	4,14	17,6	124,67	70,27	57,60	6,30	94,9
25	26	7,38	4,14	17,6	124,67	80,47	72,40	6,43	94,8
35	26	7,38	4,14	17,6	124,67	81,27	75,53	7,78	93,7
45	26	7,38	4,14	17,6	124,67	84,37	72,07	8,21	93,4
55	26	7,38	4,14	17,6	124,67	81,10	74,57	8,32	93,3
65	26	7,38	4,14	17,6	124,67	86,23	82,10	9,23	92,6
pH 5									
15	26	7,38	5,40	17,7	132	82,00	60,90	6,91	94,8
25	26	7,38	5,40	17,7	132	79,20	74,10	7,42	94,4
35	26	7,38	5,40	17,7	132	77,47	71,20	8,45	93,6
45	26	7,38	5,40	17,7	132	77,80	75,23	8,23	93,8
55	26	7,38	5,40	17,7	132	73,23	73,37	8,90	93,2
65	26	7,38	5,40	17,7	132	82,30	77,70	9,29	93,1
pH 6									
15	26	7,38	6,19	17,7	138	81,80	68,57	9,05	93,4
25	26	7,38	6,19	17,7	138	94,60	83,63	9,64	93,0
35	26	7,38	6,19	17,7	138	91,00	86,17	10,7	92,2
45	26	7,38	6,19	17,7	138	99,63	93,10	10,7	92,2
55	26	7,38	6,19	17,7	138	90,53	96,17	10,5	92,4
65	26	7,38	6,19	17,7	138	97,57	86,83	11,3	91,8
pH 7									
15	26	7,38	7,38	17,5	139,67	117,67	92,93	10,63	92,4
25	26	7,38	7,38	17,5	139,67	104,30	107,93	10,97	92,1
35	26	7,38	7,38	17,5	139,67	104,67	106,33	11,50	91,8
45	26	7,38	7,38	17,5	139,67	109,33	102,60	11,70	91,6
55	26	7,38	7,38	17,5	139,67	113,67	102,93	12,13	91,3
65	26	7,38	7,38	17,5	139,67	107,77	101,13	11,23	91,9
pH 8									
15	25	7,35	8,19	20	135,67	98,00	93,67	11,07	91,8
25	25	7,35	8,19	20	135,67	94,83	95,20	11,60	91,4
35	25	7,35	8,19	20	135,67	101,60	94,03	12,10	91,1
45	25	7,35	8,19	20	135,67	100,37	91,23	11,80	91,3
55	25	7,35	8,19	20	135,67	99,63	85,80	11,93	91,2
65	25	7,35	8,19	20	135,67	99,30	99,57	11,60	91,4

Fonte: Autora (2023).

**APÊNDICE J – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA
CATIONIZADA EM SOLUÇÃO NEUTRA (QCSN)**

QCSN (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	26	7,47	3,29	17,6	176,67	56,8	16,63	3,89	97,8
25	26	7,47	3,29	17,6	176,67	60,4	19,17	4,59	97,4
35	26	7,47	3,29	17,6	176,67	64,2	19,77	5,43	96,9
45	26	7,47	3,29	17,6	176,67	72,9	58,97	4,79	97,3
55	26	7,47	3,29	17,6	176,67	70,0	52,87	6,19	96,5
65	26	7,47	3,29	17,6	176,67	72,8	61,00	5,31	97,0
pH 4									
15	26	7,28	4	18	133,3	69,6	53,10	7,35	94,5
25	26	7,28	4	18	133,3	73,9	73,50	6,30	95,3
35	26	7,28	4	18	133,3	86,3	65,33	7,73	94,2
45	26	7,28	4	18	133,3	77,1	70,43	7,44	94,4
55	26	7,28	4	18	133,3	87,0	70,90	7,47	94,4
65	26	7,28	4	18	133,3	86,2	84,17	7,01	94,7
pH 5									
15	26	7,28	5,47	18	142,7	93,2	77,83	10,0	92,9
25	26	7,28	5,47	18	142,7	95,0	89,33	10,3	92,8
35	26	7,28	5,47	18	142,7	103,0	95,06	10,8	92,4
45	26	7,28	5,47	18	142,7	105,4	92,57	10,9	92,4
55	26	7,28	5,47	18	142,7	102,9	97,60	10,5	92,7
65	26	7,28	5,47	18	142,7	104,1	98,17	10,6	92,5
pH 6									
15	26	7,47	6,09	17,6	160,7	97,6	90,70	10,0	93,8
25	26	7,47	6,09	17,6	160,7	97,5	91,60	9,99	93,8
35	26	7,47	6,09	17,6	160,7	105,8	93,37	11,0	93,2
45	26	7,47	6,09	17,6	160,7	95,7	94,47	10,7	93,4
55	26	7,47	6,09	17,6	160,7	103,0	98,83	11,0	93,1
65	26	7,47	6,09	17,6	160,7	108,0	99,03	11,1	93,1
pH 7									
15	25	7,19	7,33	18	165	87,4	77,1	12,2	92,6
25	25	7,19	7,33	18	165	106,3	92,9	14,8	91,0
35	25	7,19	7,33	18	165	103,8	99,7	15,1	90,9
45	25	7,19	7,33	18	165	110,0	101,6	15,8	90,4
55	25	7,19	7,33	18	165	110,0	100,5	13,5	91,8
65	25	7,19	7,33	18	165	114,7	106,3	13,1	92,1
pH 8									
15	26	7,28	8,27	18	168	100,4	91,23	9,68	94,2
25	26	7,28	8,27	18	168	117,7	110,0	10,2	93,9
35	26	7,28	8,27	18	168	125,0	112,3	10,6	93,7
45	26	7,28	8,27	18	168	131,7	115,7	10,7	93,6
55	26	7,28	8,27	18	168	120,3	115,7	10,7	93,6
65	26	7,28	8,27	18	168	128,7	115,7	9,87	94,1

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE K – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM QUITOSANA NÃO ADULTERADA (QP)

QP (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	25,5	7,24	3,41	18	139	18,9	16,03	7,90	94,3
25	25,5	7,24	3,41	18	139	59,8	17,87	9,10	93,4
35	25,5	7,24	3,41	18	139	50,3	17,53	8,78	93,7
45	25,5	7,24	3,41	18	139	65,1	50,97	10,0	92,8
55	25,5	7,24	3,41	18	139	71,1	50,93	9,91	92,9
65	25,5	7,24	3,41	18	139	72,6	59,37	10,9	92,1
pH 4									
15	27	7,12	4	17,6	140,33	16,37	14,90	7,12	94,9
25	27	7,12	4	17,6	140,33	50,37	17,53	8,49	93,4
35	27	7,12	4	17,6	140,33	56,47	18,97	8,61	93,8
45	27	7,12	4	17,6	140,33	62,87	51,23	11,0	92,1
55	27	7,12	4	17,6	140,33	62,00	55,50	9,17	93,5
65	27	7,12	4	17,6	140,33	62,77	55,17	9,37	93,3
pH 5									
15	26	7,24	5,27	18	136	13,37	13,23	2,02	98,5
25	26	7,24	5,27	18	136	14,17	13,30	3,04	97,8
35	26	7,24	5,27	18	136	14,60	13,97	6,20	95,4
45	26	7,24	5,27	18	136	16,80	15,47	6,75	95,0
55	26	7,24	5,27	18	136	14,73	13,87	4,10	96,9
65	26	7,24	5,27	18	136	18,63	17,40	8,06	94,1
pH 6									
15	27	7,12	6,24	17,6	138	17,80	16,07	5,37	96,1
25	27	7,12	6,24	17,6	138	15,03	13,57	3,47	97,5
35	27	7,12	6,24	17,6	138	13,77	12,37	2,77	97,9
45	27	7,12	6,24	17,6	138	13,33	12,37	2,23	98,4
55	27	7,12	6,24	17,6	138	13,50	12,33	2,34	98,3
65	27	7,12	6,24	17,6	138	13,13	12,53	2,46	98,2
pH 7									
15	27	7,12	7,36	17,6	134,33	94,90	87,30	9,60	92,8
25	27	7,12	7,36	17,6	134,33	84,73	72,50	7,39	94,5
35	27	7,12	7,36	17,6	134,33	64,27	54,70	6,24	95,3
45	27	7,12	7,36	17,6	134,33	58,17	19,13	7,43	94,5
55	27	7,12	7,36	17,6	134,33	52,63	17,10	6,40	95,2
65	27	7,12	7,36	17,6	134,33	19,00	16,73	4,38	96,7
pH 8									
15	27	7,12	8	17,6	144	120,67	109,33	11,8	91,8
25	27	7,12	8	17,6	144	120,33	112,00	10,9	92,4
35	27	7,12	8	17,6	144	112,67	113,33	11,4	92,1
45	27	7,12	8	17,6	144	108,67	107,33	10,7	92,5
55	27	7,12	8	17,6	144	111,00	101,67	10,7	92,6
65	27	7,12	8	17,6	144	110,67	102,67	10,9	92,4

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE L – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 1%

Tanfloc 1% (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	26	7,48	3	23	133	85,37	51,67	3,97	97,0
25	26	7,48	3	23	133	98,50	65,63	3,32	97,5
35	26	7,48	3	23	133	101,3	70,73	3,70	97,2
45	26	7,48	3	23	133	102,8	76,37	4,94	96,3
55	26	7,48	3	23	133	98,40	71,33	4,07	96,9
65	26	7,48	3	23	133	95,63	78,53	3,67	97,2
pH 4									
15	25	7,27	4	25	147,33	70,47	19,07	4,57	96,9
25	25	7,27	4	25	147,33	86,13	57,97	3,99	97,3
35	25	7,27	4	25	147,33	86,07	67,03	6,62	95,5
45	25	7,27	4	25	147,33	98,07	79,20	5,09	96,5
55	25	7,27	4	25	147,33	102,2	75,17	6,57	95,5
65	25	7,27	4	25	147,33	94,13	81,27	5,15	96,5
pH 5									
15	25	7,27	5,32	25	139,33	119,0	105,8	8,73	93,7
25	25	7,27	5,32	25	139,33	117,0	105,3	11,0	92,1
35	25	7,27	5,32	25	139,33	118,3	109,7	10,8	92,2
45	25	7,27	5,32	25	139,33	118,0	102,5	10,6	92,4
55	25	7,27	5,32	25	139,33	110,3	103,8	11,1	92,1
65	25	7,27	5,32	25	139,33	110,3	98,33	11,0	92,1
pH 6									
15	25	7,27	6,42	25	155	131,0	123,3	7,35	95,2
25	25	7,27	6,42	25	155	128,0	114,3	7,13	95,4
35	25	7,27	6,42	25	155	132,3	132,0	8,92	94,2
45	25	7,27	6,42	25	155	139,7	110,3	10,6	93,2
55	25	7,27	6,42	25	155	122,7	116,3	10,1	93,5
65	25	7,27	6,42	25	155	120,3	110,7	10,9	92,9
pH 7									
15	26	7,48	7	23	135	110,7	109,7	5,18	96,2
25	26	7,48	7	23	135	104,2	101,9	8,04	94,0
35	26	7,48	7	23	135	114,7	103,7	7,29	94,6
45	26	7,48	7	23	135	100,0	99,73	9,41	93,0
55	26	7,48	7	23	135	106,4	97,47	8,13	94,0
65	26	7,48	7	23	135	97,50	107,7	10,7	92,1
pH 8									
15	26	7,48	8,17	23	138,7	12,33	9,03	0,08	99,9
25	26	7,48	8,17	23	138,7	101,7	86,1	1,23	99,1
35	26	7,48	8,17	23	138,7	117,0	111,0	2,20	98,4
45	26	7,48	8,17	23	138,7	112,7	107,3	11,7	91,5
55	26	7,48	8,17	23	138,7	118,0	109,7	10,2	92,6
65	26	7,48	8,17	23	138,7	106,7	100,4	10,0	92,7

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE M – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM TANFLOC SG 2%

Tanfloc 2% (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	28	7,38	3,44	18	141	108,7	92,40	12,1	91,4
25	28	7,38	3,44	18	141	116,7	109,3	11,4	91,9
35	28	7,38	3,44	18	141	105,7	99,77	12,7	90,9
45	28	7,38	3,44	18	141	106,3	100,3	12,1	91,4
55	28	7,38	3,44	18	141	114,7	103,0	14,3	89,8
65	28	7,38	3,44	18	141	109,3	98,67	13,3	90,5
pH 4									
15	28	7,35	4,12	20	127,3	108,3	99,80	11,1	91,3
25	28	7,35	4,12	20	127,3	103,6	104,0	12,3	90,3
35	28	7,35	4,12	20	127,3	109,0	97,17	12,3	90,3
45	28	7,35	4,12	20	127,3	105,7	97,57	11,7	90,7
55	28	7,35	4,12	20	127,3	99,27	97,60	13,1	89,7
65	28	7,35	4,12	20	127,3	115,0	96,83	12,7	89,9
pH 5									
15	28	7,35	5,14	20	130,3	123,7	114,3	11,3	91,3
25	28	7,35	5,14	20	130,3	119,7	119,3	11,7	90,9
35	28	7,35	5,14	20	130,3	113,3	111,5	12,8	90,2
45	28	7,35	5,14	20	130,3	129,3	107,3	13,1	89,9
55	28	7,35	5,14	20	130,3	120,3	111,3	13,0	90,0
65	28	7,35	5,14	20	130,3	114,3	117,0	12,8	90,1
pH 6									
15	28	7,38	6,11	17,7	139,7	110,7	104,1	10,5	92,4
25	28	7,38	6,11	17,7	139,7	110,0	112,7	10,9	92,2
35	28	7,38	6,11	17,7	139,7	103,7	110,3	11,0	92,1
45	28	7,38	6,11	17,7	139,7	108,3	108,0	12,8	90,8
55	28	7,38	6,11	17,7	139,7	111,0	106,0	11,7	91,6
65	28	7,38	6,11	17,7	139,7	100,5	107,3	11,4	91,8
pH 7									
15	28	7,38	7,27	17,7	143,7	109,8	107,7	10,1	92,9
25	28	7,38	7,27	17,7	143,7	113,3	105,4	10,3	92,8
35	28	7,38	7,27	17,7	143,7	113,0	106,5	10,6	92,6
45	28	7,38	7,27	17,7	143,7	107,7	99,43	11,8	91,8
55	28	7,38	7,27	17,7	143,7	112,0	99,40	11,9	91,7
65	28	7,38	7,27	17,7	143,7	104,1	99,50	12,1	91,6
pH 8									
15	28	7,35	8,22	20	125,7	109	94,40	0,82	99,3
25	28	7,35	8,22	20	125,7	99	101,4	11,1	91,2
35	28	7,35	8,22	20	125,7	97,8	97,70	11,0	91,3
45	28	7,35	8,22	20	125,7	111	93,07	11,5	90,9
55	28	7,35	8,22	20	125,7	92,4	93,07	11,8	90,6
65	28	7,35	8,22	20	125,7	94,6	94,57	11,5	90,8

Fonte: Autora (2023).

APÊNDICE N – RESULTADOS PARA TURBIDEZ EM ÁGUA TRATADA COM SULFATO DE ALUMÍNIO

S.A (mg/L)	Alcalinidade	pH inicial	pH ajustado	°C	NTU inicial	t=0 (uT)	t=20 (uT)	NTU final	Remoção (%)
pH 3									
15	25	7,19	3,36	18	149	93,17	76,43	7,80	94,7
25	25	7,19	3,36	18	149	91,07	70,43	10,9	92,7
35	25	7,19	3,36	18	149	83,17	59,27	8,40	94,3
45	25	7,19	3,36	18	149	81,83	57,80	10,6	92,9
55	25	7,19	3,36	18	149	70,80	52,80	9,88	93,3
65	25	7,19	3,36	18	149	73,80	59,10	7,46	94,9
pH 4									
15	28	7,25	4	17,6	148	54,93	16,20	6,25	95,7
25	28	7,25	4	17,6	148	50,40	15,10	5,97	95,9
35	28	7,25	4	17,6	148	18,67	15,13	5,73	96,1
45	28	7,25	4	17,6	148	18,23	14,97	5,75	96,1
55	28	7,25	4	17,6	148	17,97	14,27	4,50	96,9
65	28	7,25	4	17,6	148	17,23	14,37	4,46	96,9
pH 5									
15	28	7,25	5,40	17,6	139	13,50	12,00	3,09	97,8
25	28	7,25	5,40	17,6	139	13,43	11,67	3,62	97,4
35	28	7,25	5,40	17,6	139	13,13	11,47	2,70	98,0
45	28	7,25	5,40	17,6	139	13,33	11,77	3,60	97,4
55	28	7,25	5,40	17,6	139	13,33	11,83	3,36	97,6
65	28	7,25	5,40	17,6	139	13,17	11,76	3,24	97,7
pH 6									
15	28	7,25	6,40	17,6	133	11,77	9,93	1,66	98,7
25	28	7,25	6,40	17,6	133	13,50	10,9	1,85	98,6
35	28	7,25	6,40	17,6	133	15,53	11,8	2,37	98,2
45	28	7,25	6,40	17,6	133	16,83	13,17	2,72	97,9
55	28	7,25	6,40	17,6	133	17,37	13,73	1,95	98,5
65	28	7,25	6,40	17,6	133	17,97	14,17	2,47	98,1
pH 7									
15	25	7,19	7,19	18	157	9,89	5,83	1,94	98,8
25	25	7,19	7,19	18	157	11,1	6,68	1,68	98,9
35	25	7,19	7,19	18	157	11,6	8,67	1,60	99,0
45	25	7,19	7,19	18	157	15,3	11,7	1,66	98,9
55	25	7,19	7,19	18	157	59,9	17,6	2,24	98,6
65	25	7,19	7,19	18	157	76,4	56,5	5,93	96,2
pH 8									
15	28	7,25	8,15	17,6	143	7,00	2,89	1,35	99,0
25	28	7,25	8,15	17,6	143	9,70	2,48	1,37	99,0
35	28	7,25	8,15	17,6	143	11,7	2,28	1,36	99,0
45	28	7,25	8,15	17,6	143	11,8	2,52	1,26	99,1
55	28	7,25	8,15	17,6	143	13,1	2,62	1,38	99,0
65	28	7,25	8,15	17,6	143	13,6	2,98	1,43	99,0

Fonte: Autora (2023).