

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

FERNANDO PREVIATO BAZZO

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE POLÍMEROS NATURAIS DE *Ceratonia*
siliqua L. E *Moringa oleifera* LAM COMO AGENTES COAGULANTES
APLICADOS EM TRATAMENTO DE ÁGUA DESTINADA AO
ABASTECIMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2016

FERNANDO PREVIATO BAZZO

ANÁLISE MULTIVARIADA DE POLÍMEROS NATURAIS DE *Ceratonia siliqua* L. E *Moringa oleifera* LAM COMO AGENTES COAGULANTES APLICADOS EM TRATAMENTO DE ÁGUA DESTINADA AO ABASTECIMENTO

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental do Departamento Acadêmico de Ambiental – DAAMB da Universidade tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientadora: Profa. Dra. Flavia Vieira da Silva Medeiros

CAMPO MOURÃO

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE MULTIVARIADA NA AVALIAÇÃO DE POLÍMEROS NATURAIS DE
Ceratonia siliqua L. E *Moringa oleifera* LAM COMO AGENTES COAGULANTES
APLICADOS EM TRATAMENTO DE ÁGUA DESTINADA AO ABASTECIMENTO

por

FERNANDO PREVIATO BAZZO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 23 de junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Flavia Vieira da Silva Medeiros

Prof. Dr. Paulo Henrique Março

Prof. Dr. Rafael Montanhini Soares de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, principalmente aos meus pais, Luiz e Rosimeire, meu irmão, Filipe, por terem me incentivado e apoiado durante etapa importante na minha vida. Em todos os momentos eles estiveram comigo me guiando e dando forças para continuar a trilhar o meu caminho com sabedoria e dedicação, até mesmo quando me ausentei para tornar realidade o sonho de estudar em outro país.

Agradeço aos meus amigos que conquistei na universidade em que estudei e os que conheci na minha viagem à Austrália, pois foram eles que tornam esse período digno de lembranças que jamais esquecerei. Em especial, cito o Arthur, Thiago, Felipe, Isabela, Pedro, Dóris, Beatriz, Carolina, Rafael e Thaís, que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. Também agradeço à Lais, ao Jaime e à Heloise, por ter contribuído na execução deste projeto.

Em especial, agradeço à minha orientadora, Flávia, que se mostrou uma pessoa dedicada, determinada, comprometida e (muito) paciente; seus diferenciais tornaram superior o aprendizado adquirido na etapa final do meu curso.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná que me forneceu estrutura e oportunidades, somente possível devido ao seu comprometimento com a educação e o futuro profissional dos seus alunos.

Por fim, agradeço a todos os meus professores que se dedicaram a fornecer uma fração do seu conhecimento em cada disciplina cursada, suficiente para abrir novas oportunidades para a minha futura carreira profissional.

RESUMO

BAZZO, F. P. Análise multivariada na avaliação de polímeros naturais de *Ceratonia siliqua* L. e *Moringa oleífera* Lam como agentes coagulantes aplicados em tratamento de água destinada ao abastecimento. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Departamento Acadêmico Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

O consumo de água está aumentando no Brasil e, devido à alta demanda deste recurso natural, estações de tratamentos de água estão usando coagulantes químicos para atender aos padrões de qualidade da água. A utilização de coagulantes à base de alumínio pode resultar em várias doenças degenerativas devido a quantidade residual do metal na rede de distribuição, tal como o mal de Alzheimer. De modo a diminuir ou evitar esses efeitos negativos, há diversas pesquisas cujo foco incide em substituir estes produtos químicos por compostos orgânicos capazes de apresentar atividade coagulante. Através do método *Jar-test* e do programa computacional "Matlab", este estudo propõe comparar dois extratos orgânicos diferentes em testes de coagulação/floculação: *Moringa oleífera* (moringa) e *Ceratonia siliqua* (alfarroba). As soluções de moringa mostraram alta flexibilidade em diferentes condições de concentração de sal, massa de sementes e pH para tratar a água bruta de forma eficiente. Por outro lado, as soluções da alfarroba demonstraram dependência de valores elevados de pH para atingir o desempenho ótimo. Apesar do fato de que os compostos orgânicos podem originar subprodutos cancerígenos na fase de desinfecção, estudos semelhantes envolvendo análise de COD (Carbono Orgânico Dissolvido), COT (Carbono Orgânico Total) e MOD (Matéria Orgânica Dissolvida) demonstraram que essas soluções orgânicas têm baixo potencial para ultrapassar a concentração máxima de 100 mg / L, estabelecido pela legislação, assegurando a segurança na utilização de tais compostos. As duas variações de coagulantes orgânicos obtiveram alta remoção de turbidez, chegando a 93% na eficiência com valor final de 6,1 NTU; entretanto, de acordo com a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, a turbidez está acima do valor máximo permitido.

Palavras-chave: Trihalometano, tratamento de água, coagulantes orgânicos.

ABSTRACT

BAZZO, F. P. Multivariate analysis in the evaluation of natural polymers from *Ceratonia siliqua* L. and *Moringa oleifera* Lam as coagulating agents applied in water treatment destined to human supply. Conclusion major assignment (Environmental Engineering) – Environmental Academic Department, Federal University of Technology – Paraná. Campo Mourão, 2016

Water consumption is increasing in Brazil and, because of the high demand for this natural resource, water treatments plants are using chemical coagulants to attend to water quality patterns. The usage of aluminum-based coagulants can result in several degenerative diseases due the residual amount of this metal in the distribution web, such as Alzheimer's. In order to decrease or avoid these negative effects, there are several researches which focus is to replace these chemicals for organic compounds capable of coagulation activity. Through the Jar-test method and the software "Matlab", this study proposes to compare two different organic extracts in coagulation/flocculation tests: *Moringa oleifera* (moringa) and *Ceratonia siliqua* (carob tree). The moringa solutions showed high flexibility in different conditions of salt concentration, seed mass and pH to treat raw water efficiently. On the other hand, the carob tree solutions demonstrate dependence on high pH values to reach optimal performance. Despite the fact that organic compounds can originate carcinogenic byproducts in the disinfection stage, similar studies involving DOC (Dissolved Organic Carbon), TOC (Total Organic Carbon) and DOM (Dissolved Organic Matter) analysis had shown that these organic solutions have low potential to surpass the maximum concentration of 100 µg/L, established by Brazilian legislation, ensuring the security in using such compounds. Both organic coagulants types obtained high removal of turbidity, reaching 90% in efficiency with 6,1 NTU as final value; however, according to the specific Brazilian resolution 2914/2011 from the Health Ministry, turbidity is above the maximum permitted value.

Keywords: trihalomethane, water treatment, organic coagulants.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Determinação do fator significativo para a remoção de cor com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante com diferentes valores de massa de semente (x), concentração salina (y) e pH (z) (1=média, 2=x, 3=y, 4=z, 5= x*y, 6= x*z, 7=y*z, 8=x ² , 9=y ² , 10= z ²).....	36
Gráfico 2 - Determinação do fator significativo para a remoção de cor com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante com diferentes valores de massa de semente (x), concentração salina (y) e pH (z) (1=média, 2=x, 3=y, 4=z, 5= x*y, 6= x*z, 7=y*z, 8=x ² , 9=y ² , 10= z ²).....	38
Gráfico 3 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de turbidez com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante.	40
Gráfico 4 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de cor com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante.....	40
Gráfico 5 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COD com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante.....	41
Gráfico 6 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COT com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante.....	41
Gráfico 7 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de DOM com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante.....	42
Gráfico 8 - Avaliação de parâmetros significativos na formação de lodo com <i>Moringa oleifera</i> como agente coagulante.....	42
Gráfico 9 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de turbidez com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante.....	43
Gráfico 10 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de cor com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante.....	44
Gráfico 11 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COD com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante.....	44
Gráfico 12 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COT com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante.....	45
Gráfico 13 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de MOD com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante.....	45
Gráfico 14 - Avaliação de parâmetros significativos na formação de lodo com <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante.....	46
Gráfico 15 - Remoção de cor por <i>Moringa oleifera</i> e <i>Ceratonia siliqua</i>	48
Gráfico 16 - Remoção de cor por <i>Moringa oleifera</i> e <i>Ceratonia siliqua</i>	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da água bruta coletada na Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) de Campo Mourão.....	29
Tabela 2 - Caracterização dos coagulantes obtidos a partir de sementes de <i>Moringa oleífera</i>.	30
Tabela 3 - Caracterização dos coagulantes obtidos a partir de sementes de <i>Ceratonia siliqua</i>.	30
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de <i>Moringa oleífera</i> como coagulante.....	31
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de <i>Ceratonia siliqua</i> como coagulante.....	31
Tabela 6 - Resultados simplificados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de <i>Moringa oleífera</i> como coagulante.....	32
Tabela 7 - Resultados simplificados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de <i>Ceratonia siliqua</i> como coagulante.	32
Tabela 8 - COT, COD e MOD proveniente dos resultados com <i>Moringa oleífera</i>.....	33
Tabela 9 - COT, COD e MOD proveniente dos resultados com <i>Ceratonia siliqua</i>.	33
Tabela 10 - Resultados dos ensaios da solução <i>Ceratonia siliqua</i> como agente coagulante..	47
Tabela 11 - Resultados dos ensaios da solução <i>Moringa oleífera</i> como agente coagulante..	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA.....	13
3.1.1 Cor.....	13
3.1.2 Turbidez.....	14
3.1.3 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	14
3.2 TRATAMENTO DA ÁGUA.....	15
3.2.1 Estação de Tratamento de Água Convencional.....	16
3.2.2 Coagulação e Mistura Rápida.....	17
3.2.2.1 Coagulação com Sulfato de Alumínio.....	17
3.2.3 Floculação.....	18
3.2.4 Decantação.....	18
3.2.5 <i>Jar-Test</i>	19
3.3 COAGULANTES ORGÂNICOS.....	19
3.3.1 <i>Moringa oleifera</i> como Coagulante Orgânico.....	20
3.3.2 <i>Ceratonia siliqua</i> como Coagulante Orgânico.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA.....	23
4.2 EXTRAÇÃO DO COAGULANTE.....	23
4.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.....	25
4.4 ANÁLISE MULTIVARIADA.....	28
4.5 CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO DAS SEMENTES.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA.....	29
5.2 EXTRAÇÃO DOS COAGULANTES E CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO DAS SEMENTES.....	29
5.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.....	30
5.4 ANÁLISE MULTIVARIADA.....	34

5.4.1	Análise dimensional para determinação dos parâmetros significativos no tratamento	35
5.4.1.1	Análise multivariada com os dados obtidos no tratamento <i>com Moringa oleifera</i>	35
5.4.1.2	Análise multivariada com os dados obtidos no tratamento com <i>Ceratonia siliqua</i>	37
5.4.2	Análise tridimensional para avaliação dos parâmetros significativos no tratamento	39
5.4.2.1	Análise para <i>Moringa oleifera</i>	39
5.4.2.2	Análise para <i>Ceratonia siliqua</i>	43
5.5	ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO PARA O FATOR SIGNIFICATIVO	46
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O consumo de água per capita no Brasil vem aumentando nos últimos anos e, em contrapartida, o percentual de perdas média na rede de distribuição de água está diminuindo, o que mostra uma maior eficiência no sistema de distribuição. No ano de 2013, o consumo de litros de água por habitante foi de 166,3 litros, um aumento significativo quando comparado com 2008, com consumo de 151,2 litros (BRASIL, 2014).

Várias das etapas do tratamento de água recebe uma grande carga química para que as impurezas e microrganismos sejam reduzidos a níveis de potabilidade, e isso acarreta em uma maior quantidade de químicos, como os coagulantes tradicionais. Ribeiro (2007) mostra em seu estudo que grande parte do lodo formado é proveniente dos compostos químicos usados no tratamento da água.

Na fase de coagulação, os principais coagulantes químicos usados são o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, sendo o primeiro mais utilizado no Brasil, por suas características de reação com a alcalinidade natural que a água bruta possui (RICHTER, 2009), além de ter baixo custo e alta oferta no mercado. Portanto uma grande quantidade de alumínio é usada para o tratamento, podendo ser levado as residências e, se mal manejado, pode ser despejado nos corpos hídricos da região (FRANCO, 2009).

Os efeitos do alumínio no ser humano ainda são poucos conhecidos, não tendo comprovação definitiva de sua toxicidade. Porém, há diversos estudos que relacionam o alumínio com doenças degenerativas e demência. A principal relação feita com este metal é com a doença de Alzheimer. Rondeau et al. (2000) mostra em seu estudo que a ingestão de alumínio por via hídrica tem influência significativa para aumentar a suscetibilidade à doença. Outras análises também mostram que o metal pode ter relação com a doença de Parkinson e outras doenças degenerativas, além de inflamações no sistema nervoso central (BONDY, 2010).

Além dos impactos causados no ser humano, o alumínio também tem impactos significativos no meio ambiente. Gensemer e Playle (1999) descreve impactos principalmente na fauna bentônica (principal fonte de alimento dos peixes), pois esta é comprometida quando há despejo de efluentes, contendo alumínio, nos corpos hídricos, isolando-os e causando sua mortalidade por agir ao nível celular em algas, pois causava anormalidades em sua estrutura. A

população de peixes também mostra respostas negativas quanto ao aumento de alumínio na água, quando despejado em corpos hídricos de baixo pH, por interferir em seu sistema respiratório, levando à mortalidade dos mesmos.

Existem diversos estudos que objetivam a substituição destes coagulantes tradicionais usando alternativas naturais, podendo levar à diminuição de compostos químicos usados na água. O principal coagulante natural relatado na literatura é derivado da semente da *Moringa oleifera* Lam (moringa). Suas proteínas têm alto poder de coagulação (MADRONA et al., 2012) e são biodegradáveis, mas precisam ser purificadas para não aumentar a carga orgânica na água e formar os trihalometanos (substâncias cancerígenas). Porém, a disponibilidade dessa semente pode ser um limitador para o seu uso por não ser encontrada em quantidade suficiente para atender a demanda de tratamento de água.

Além da *Moringa oleifera* Lam, a outros vegetais foram avaliados como coagulantes. Šćiban et al. (2005) fez experimentos com diversas sementes de leguminosas e detectou que a semente da *Ceratonia siliqua* L. (alfarroba) possui alto poder coagulante.

Visando obter maior número de alternativas de coagulantes orgânicos para o tratamento de água de mananciais superficiais, este estudo propõe analisar e comparar soluções coagulantes da *Ceratonia siliqua* L e da *Moringa oleifera* Lam.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa analisar a função coagulante das sementes da alfarroba, a fim de avaliar sua eficiência e concentração ótima a ser usada, e comparar com a moringa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a água bruta coletada;
- Realizar a extração do coagulante das sementes de moringa e alfarroba;
- Caracterizar o extrato das sementes quanto ao seu conteúdo proteico;
- Avaliar o poder coagulante dos extratos proteicos em ensaios de coagulação/floculação seguindo planejamento fatorial 2^3 ;
- Avaliar os dados obtidos pelo método dos mínimos quadrados parciais (PLS), para obter as melhores condições de remoção dos parâmetros avaliados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA

A água bruta nunca é encontrada em sua forma pura por estar associada a diversos minerais, microrganismos, matéria orgânica e inorgânica, etc. Este líquido contém 3 formas de impurezas: em suspensão, em estado coloidal e dissolvidas (RICHTER; NETTO, 1991).

A qualidade ideal da água depende do seu uso. Água destinada para o consumo humano não deve ter cor, sabor, odor e nenhum fator que possa causar enfermidade ao ser humano. Para determinar a qualidade da água, há parâmetros químicos, físicos e biológicos que devem ser analisados (RICHTER; NETTO, 1991).

As características físicas da água têm pouca importância sanitária e são facilmente determinadas. O processo de coagulação química geralmente resolve problemas relacionados a estes aspectos (RICHTER; NETTO, 1991), sendo o principal foco deste estudo. Dentre os diversos exames físicos a serem analisados, destaca-se os de análise mais usual: cor, turbidez e pH.

3.1.1 Cor

A água em seu estado puro não possui cor, e quando apresenta esta característica, é devido a substâncias dissolvidas, o que não é necessariamente um risco para a saúde humana (RICHTER; NETTO, 1991; MACÊDO, 2000).

Devido às partículas em suspensão, a água pode aparentar ter cor acima do real, sendo denominada como cor aparente. A cor real é descrita como aquela sem a presença da turbidez (materiais em suspensão) como fator de interferência (MACÊDO, 2000).

Essa característica é principalmente decorrente a matéria orgânica presente na água, originado de restos animais e vegetais, mas também é ocorrente através de compostos inorgânicos como ferro e manganês. Sua remoção passou a ter mais importância quando foi evidenciado a formação de trihalometanos na fase de desinfecção (por ser derivado principalmente da reação com

cloro), ocasionados pela matéria orgânica que reage com cloro livre (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; MACÊDO, 2000; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Para mensurar esse característica, pode ser usado o colorímetro, que oferece resultados rápidos e precisos, facilitando a medição da cor.

3.1.2 Turbidez

Esta característica é determinada por partículas suspensas na água, provocando dispersão e absorção da luz, dando uma aparência nebulosa. Pode ser causada por partículas de argila ou lodo, descarga de esgoto doméstico ou industrial, ou ainda microrganismos presentes (RICHTER; NETTO, 1991; MACÊDO, 2000; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Um aparelho frequentemente usado para determinar a turbidez da água, é conhecido como turbidímetro, que proporciona valores instantâneos e precisos (quando corretamente calibrados), além de ter baixo custo (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Reduzir essa característica a um valor mínimo é extremamente importante para que o processo de desinfecção seja eficiente, ou seja, quanto menor a turbidez, maior a eficácia do processo mencionado (RICHTER; NETTO, 1991; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

3.1.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Este termo é usado para avaliar o nível de acidez ou alcalinidade de um meio através da medição da concentração do íon hidrogênio. Seus valores variam de 0 a 14, caracterizando meios como ácido, se seus valores forem menores que 7, básico, se maior que 7, e neutro, quando o valor do pH é exatamente igual a 7 (que é valor esperado para águas potáveis). Este parâmetro é muito importante em diversos processos do tratamento de água, como a coagulação, floculação, desinfecção e no controle de corrosão (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Sua determinação pode ser feita de várias formas como, por exemplo, usando indicadores que mudam de cor quando passam de determinadas faixas de pH. Os mais comuns são o vermelho

de clorofenol, vermelho de fenol, azul de bromotimol e azul de timol. Entretanto, existem aparelhos, como o peagâmetro, que dão mais praticidade e precisão para a determinação do pH, sendo largamente usados no tratamento de água (RICHTER; NETTO, 1991).

O pH da água de abastecimento público varia entre 6,5 a 9,5, tendo como ideal valores próximos de 7 para evitar corrosões de estruturas, quando a água é ácido, ou incrustações, em caso de águas básicas (RICHTER; NETTO, 1991; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

3.2 TRATAMENTO DA ÁGUA

Devido à complexidade que a água bruta possui na natureza, seu tratamento deve ser escolhido com cuidado, pois cada manancial possui suas próprias características. Portanto, não há um tratamento modelo que pode ser aplicado a água de todos os corpos hídricos, sendo necessário fazer análise da mesma para então determinar a quantidade de produtos químicos a serem usados (coagulantes, substâncias cloradas, ect) e quais etapas são necessárias para que a água se torne potável (RICHTER; NETTO, 1991).

Dentre as impurezas encontradas na água, podem ser encontrados microrganismos patogênicos, como vírus e bactérias, que devem ser eliminados no tratamento. Para não haver a rejeição pela população, deve-se pensar inclusive em reduzir parâmetros importantes como cor, turbidez, sabor e odor da água (RICHTER, 2009).

Os processos de tratamento variam de acordo com a água a ser tratada, sendo principalmente adotados os seguintes processos (RICHTER; NETTO, 1991)

- Instalação de desferrização: usada em casos em que a água é límpida, com qualidade bacteriológica e excesso de ferro.
- Filtros lentos: soma de cor e turbidez não ultrapassando 60 mg/l.
- Tratamento químico, floculação, decantação e filtração rápida: águas que contenham valores significativos de cor e turbidez.
- Superfiltros: turbidez abaixo de 200 UJT (Unidade Jackson de Turbidez) e contendo cor.

- Filtros de fluxo ascendente: água deve conter turbidez baixa ou moderada, contaminação e teor de sólidos em suspensão baixos.

3.2.1 Estação de Tratamento de Água Convencional

Águas com turbidez elevada são as mais comuns pelo fato da maioria das estações de tratamento de água captarem de corpos hídricos superficiais, que possuem maior potencial para o carregamento de partículas, principalmente em áreas com alto índice pluviométrico. No Brasil, as estações de tratamento de água (ETA) convencionais são as mais comuns, por serem adequadas para águas turvas de até 1000 UNT, e quando ultrapassado esse valor, o uso de pré-sedimentadores é necessário (RICHTER, 2009).

O tratamento convencional possui diversas etapas, sendo estas determinadas como (RICHTER, 2009):

- Pré-tratamento, em que são produzidos flocos sedimentáveis por coagulação (mistura rápida) e floculação
- Decantação: utilizado para separar os flocos produzidos da água tratada através da força de gravidade
- Filtração que tem função de eliminar os flocos restantes que não foram sedimentados na etapa anterior

A água segue para a desinfecção, que tem como objetivo eliminar microrganismos da água, pois estes não são totalmente eliminados nos processos anteriores, e assim ser feito a distribuição para a população. O principal método usado nesta etapa é a cloração, porém há outras maneiras de eliminar estes microrganismos como a aplicação de ozônio, sendo mais utilizado na Europa (RICHTER; NETTO, 1991; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Os processos mais analisados no tratamento de água são os de coagulação, floculação e decantação por ser possível ser avaliado em laboratório por *jar-test*. Este método de análise é usado para determinar a quantidade de coagulantes e produtos alcalinizantes a serem adicionados na água bruta (RICHTER, 2009).

3.2.2 Coagulação e Mistura Rápida

O processo da coagulação envolve a aplicação de produtos químicos com fim de precipitar os compostos em solução e desestabilizar suspensões coloidais de partículas sólidas. Esta etapa pode ser definida como a alteração físico-química de partículas coloidais da água, que tem como características em destaque a cor e turbidez, produzindo assim partículas de tamanho suficiente para que seja possível separar por processos físicos, como a sedimentação (LEME, 1990; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; RICHTER, 2009; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Este processo é caracterizado pela adição dos coagulantes, reduzindo a força que as partículas têm de se manterem separadas. Para que a coagulação esteja completa, deve ser feita uma mistura rápida dos coagulantes com a água, seguido de uma agitação lenta para que os flocos sejam formados (RICHTER, 2009).

São considerados quatro mecanismos diferentes com função de coagulação: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização, varredura, e adsorção e formação de pontes. O trabalho desenvolvido utilizou o mecanismo de varredura, que consiste em utilizar altas doses de coagulante para formar precipitados que se ligam às partículas coloidais presentes na água e, posteriormente, formam flocos com maior velocidade de sedimentação (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002).

Os coagulantes com maior uso para tratamento de esgoto industrial e doméstico são os sais de alumínio e ferro, sendo o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3 \text{H}_2\text{O}$, o mais comum. Estes sais são utilizados em conjunto alcalinizantes para tornar o pH compatível com a faixa de funcionamento do coagulante. A adição de compostos para elevar o pH se deve à capacidade destes sais consumirem a alcalinidade natural da água, tornando-a mais ácida e prejudicando a eficiência na coagulação (LEME, 1990; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; MACÊDO, 2000; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

3.2.2.1 Coagulação com Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio é geralmente armazenado em embalagens de madeira, chumbo, com revestimento de borracha, plástico, epóxi ou aço inoxidável, devido ao seu alto poder corrosivo.

Quando disponibilizado em solução líquida, sua concentração é padronizada em 8% (RICHTER, 2009).

A solução consome alcalinidade por se associar com as moléculas de hidroxilas presentes na água, formando o hidróxido de alumínio. Sua solubilidade depende diretamente do pH, que é mais baixa entre os valores de 5 e 7. Caso a solução esteja fora dessa faixa, a coagulação não ocorre. Devido a insolubilidade do composto, esta serve como núcleo de floculação, onde os compostos coloidais são atraídos, formados flocos pesados para serem sedimentados na etapa posterior à floculação (RICHTER, 2009).

3.2.3 Floculação

A etapa seguinte a coagulação promove a colisão destas partículas para que sejam formadas partículas maiores, podendo ser chamada de floculação. Este processo é caracterizado pela aglutinação dos microflocos para formar o floco, em um processo de mistura lenta. Este processo tem finalidade de fazer com que flocos se formem e adquiram tamanho necessário para uma melhor sedimentação, flotação ou filtração. (LEME, 1990; MACÊDO, 2000; DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002; RICHTER, 2009; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

3.2.4 Decantação

Processo físico usado para a separação das partículas sólidas que estão em suspensão na água, utilizando apenas a força da gravidade, pois os sólidos presentes têm densidade maior que o da água. O processo de decantação é seguido da floculação, sendo usado para separar os flocos, formados anteriormente, da água tratada. Devido ao fato das partículas presentes na água terem baixa velocidade de decantação, é essencial a etapa de coagulação ser feita de maneira eficiente, evitando sobrecarga no filtro (LEME, 1990; DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Os decantadores podem ser tanques simples, que são eficientes e pouco sensíveis às condições de sobrecarga; ou também decantadores tubulares que são constituídos por módulos tubulares inclinados com determinado ângulo, reduzindo a área necessária para ocorrer o processo (LEGNER, 2013).

3.2.5 Jar-Test

O *jar-test* é o método mais utilizado atualmente para avaliar os processos de coagulação e floculação, sendo possível avaliar inclusive os efeitos da análise na fase de decantação. As variáveis geralmente avaliadas neste teste são a dosagem ótima de coagulante e outros reagentes, concentração ótima, intensidade e tempo de floculação, sequência de aplicação de reagentes, etc. (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002; RICHTER, 2009).

O principal uso do *jar-test* é para determinar a quantidade de coagulantes e seus auxiliares a serem usados no tratamentos de água (RICHTER, 2009), o que o torna ideal para ser utilizado neste trabalho por avaliar a quantidade ótima de coagulantes alternativos que surtiram efeito no tratamento de água bruta.

O método consiste em utilizar seis béqueres ou jarros de 1 a 2 litros, e que tenham uma armação para estes recipientes, sendo impulsionados por um mesmo motor. Estes agitadores possuem um controlador de velocidade que mantém a rotação constante. Nestes recipientes são adicionadas doses diferentes de coagulantes ou alcalinizantes para determinar qual a concentração ótima destes produtos a serem utilizados (RICHTER, 2009).

3.3 COAGULANTES ORGÂNICOS

A discussão sobre o uso de coagulantes orgânicos, provenientes de compostos vegetais, é devido aos inúmeros impactos ambientais causados pelos coagulantes tradicionais, principalmente os compostos de alumínio. O problema de usar os sais de alumínio e compostos para corrigir o pH

é que estas substâncias não são biodegradáveis, deixando resquícios na água e no lodo formado no tratamento (CRUZ, 2004).

Coagulantes orgânicos podem ser definidos como polímeros, sendo cadeias de pequenas subunidades ou monômeros, se diferenciando dos coagulantes sintéticos que contém apenas um monômero ou dois ou três tipos de subunidades diferentes. Estes polímeros podem ser originados de proteínas vegetais, quando contem grupos ionizáveis do tipo carboxil ou amino, tendo massas moleculares elevadas. Estes polímeros de massa elevada favorecem a floculação por estabelecer ligações com as partículas menores que estão dispersas na água, ocorrendo aglutinação mais eficiente. Os coagulantes não consomem a alcalinidade natural da água, o que dispensa uso de corretivos de pH na água, além de promover menor formação de lodo e com baixo teor de metais (NISHI et al, 2011; VANACÔR, 2005).

O maior benefício encontrado no tratamento com polímeros orgânicos é destinação final do lodo. Por ser um composto biodegradável, o resíduo pode ser reaproveitado como adubo ou receber destinação menos lesiva ao meio ambiente. Em contrapartida, lodo proveniente de coagulação química tem como principal alternativa a destinação final em aterros sanitários, por ser considerado resíduo sólido (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002).

3.3.1 *Moringa oleifera* como Coagulante Orgânico

A *Moringa oleifera* Lam (moringa) é uma das plantas mais estudadas para fins de coagulação. A moringa é nativa da Índia, mas ocorre em diversas regiões tropicais, sendo tolerante à seca. As sementes da moringa contem compostos ativos que atuam em partículas coloidais, que neutralizam suas cargas e formam ligações entre as partículas, ocorrendo assim a floculação e, posteriormente, sedimentação dos flocos formados. Os coagulantes dessas sementes podem ser preparados em solução aquosa ou salina, e promove a remoção de cor, turbidez e coliformes totais e termotolerantes (NISHI et al, 2011).

Apesar das proteínas da moringa terem uso na coagulação em tratamento de água, o extrato bruto da sua semente não pode ser usado por aumentar a quantidade de carbono orgânico dissolvido (COD) na água. Com o aumento do COD na água, pode haver a produção de organoclorados como

o trihalometano, que a torna imprópria para o consumo (BAPTISTA et al., 2015; SÁNCHEZ-MARTÍN et al., 2010). Portanto, há a necessidade do emprego de métodos para a purificação da proteína, para que não encareça o tratamento e possa ser tão viável quanto os sais de alumínio.

Para ser feita a extração das proteínas com propriedades coagulantes, deve-se moer a semente da Moringa . A extração pode ser feita através de soluções salinas ou água destilada, entretanto, a quantidade de proteína extraída difere nos dois meios. O método consiste em misturar o extrato da semente com a solução salina ou água destilada e fazer filtração à vácuo, para que sejam retirados os sólidos das soluções. Alguns métodos incluem a remoção de substâncias oleosas com etanol, diminuindo a quantidade de COD residual na água após o tratamento ser feito. (BAPTISTA et al., 2015; MADRONA et al., 2012; SÁNCHEZ-MARTÍN et al., 2010).

3.3.2 *Ceratonia siliqua* como Coagulante Orgânico

A alfarroba, assim como a moringa, pertence ao grupo das leguminosas, sendo nativa do Mediterrâneo. Estudos feitos com proteínas de diversas leguminosas mostraram que esta planta possui poder coagulante significativo e foi capaz de remover a turbidez da água bruta. Šćiban et al. (2005) testou a proteína da alfarroba como coagulante e obteve mais de 75% de remoção de turbidez da água com concentração de coagulante de 10 mg/l, mostrando ter melhor eficiência quando a turbidez inicial da água é mais alta.

Bonner e Karrfalt (2008) apontam que a alfarroba é rica em taninos, podendo ser o motivo da semente ter potencial coagulante. Piantá (2008) descreve que este composto possui propriedades fenólicas que tem capacidade de precipitar proteínas, sendo utilizada como substituto do sulfato de alumínio em estações de tratamento de água de indústrias químicas e petroquímicas no Brasil e Europa. As vantagens de usar o tanino no tratamento devem-se ao seu baixo custo, menor concentração de sulfatos no efluente final e menor geração de lodo. O lodo gerado nos tratamentos são orgânicos e não-perigosos, facilitando a sua eliminação no ambiente.

O uso comercial do tanino já é feito no Brasil com nome comercial de tanfloc, e uma das empresas que comercializam esse produto é TANAC, situada no Rio Grande do Sul. O tanfloc é

produzido a partir da *Acacia Mearnsii* De Wild. (Acácia negra), sendo descrito como um polímero catiônico e é recomendado para o tratamento de águas de abastecimento em geral (PIANTÁ, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios e extrações de coagulantes foram realizados no Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Campo Mourão.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA

A água bruta foi coletada na estação de tratamento de água na SANEPAR (Companhia de Saneamento do Estado do Paraná) no dia 30 de março de 2016, localizada na cidade de Campo Mourão, e foi caracterizada em relação aos seguintes parâmetros: cor, turbidez, pH, UV254 nm e UV272 nm.

O valor do UV254 foi utilizado para o cálculo do Carbono Orgânico Total (COT) e Carbono Orgânico Dissolvido (COD), com as Equações 1 e 2, respectivamente. Para o cálculo de Matéria Orgânica Dissolvida, foi utilizado o valor do UV272 (Equação 3). Para determinar estas equações, foram consultados artigos que relacionam essas variáveis (DEFLANDRE; GAGNÉ, 2001; WESTPHAL; CHAPRA; SUNG, 2004; EDZWALD; KAMINSKI, 2009; KHAN et al., 2014).

$$COT (mg * L^{-1}) = 1,12 + 20,2 * UV_{254} \quad (\text{Equação 1})$$

$$COD(mg * L^{-1}) = 2,27 + 0,653 * UV_{254} \quad (\text{Equação 2})$$

$$MOD(mg * L^{-1}) = 518,93 * UV_{272} + 1.065 \quad (\text{Equação 3})$$

4.2 EXTRAÇÃO DO COAGULANTE

Assim como a metodologia aplicada por Sanchez-Martín et al. (2010), as cascas das sementes foram extraídas manualmente e moídas em liquidificador doméstico, porém a alfarroba foi adquirida já triturada, sendo necessário a moagem apenas das sementes de moringa. O pó foi

processado com etanol a 95% para remoção de ácidos graxos, utilizando um agitador magnético por 45 minutos (Figura 1). O sobrenadante foi separado por centrifugação a 3000 rotações por minuto (rpm) por 45 minutos e o pó resultante foi seco através de uma estufa à 60° C até o dia posterior.

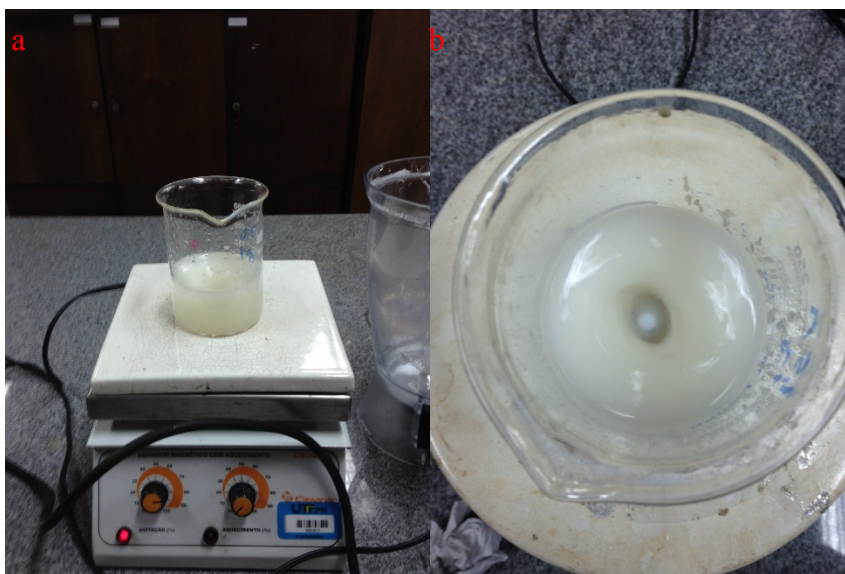


Figura 1 - a) Vista frontal do funcionamento do agitador magnético na extração do coagulante, b) Vista superior do funcionamento do agitador magnético na extração do coagulante.

No preparo do coagulante em meio salino, foram usados duas quantidades diferentes de extrato de semente processada e duas concentrações diferentes de cloreto de sódio. Um grama de semente processada foi dissolvida em 0,1 L de solução salina com concentração de 0,5 e 1,5 M (concentração molar). Foi realizada turbólise durante 3 minutos para misturar a solução salina com o pó da semente, seguida de agitação em agitador magnético por 30 minutos. Após agitação, a solução foi submetida a filtração à vácuo em papel de filtro de qualidade e em uma membrana de fibra de vidro de poro 0,9 μm (Baptista et al., 2015), obtendo-se assim o coagulante em meio líquido (Figura 2).

O mesmo procedimento foi feito com dois gramas de extrato de semente, com o objetivo de retirar uma maior concentração de coagulante a ser testado no tratamento.

Todos os procedimentos descritos neste item foram feitos para as sementes da alfarroba e da moringa.

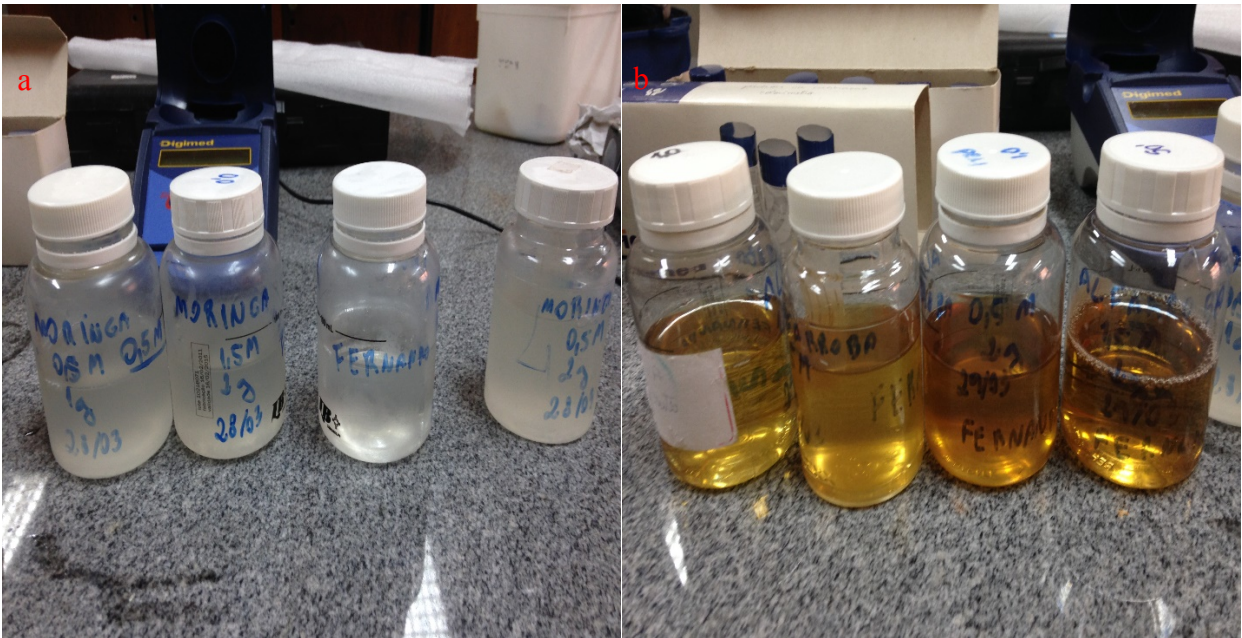


Figura 2 - a) Soluções de *Moringa oleifera*, b) Soluções de *Ceratonia siliqua*

4.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Os ensaios de coagulação foram realizados no *Jar-Test* 6 provas de marca Nova Ética (Figura 3), com regulador de rotação das hastes misturadoras, sendo todos em duplicata. Os testes foram elaborados com diferentes valores de pH, extrato de semente e concentração molar de sal: 7,0 e 11,0 para o pH, 1 e 2 gramas de extrato de semente, e concentração salina de 0,5 e 1,5 M. A temperatura das amostras foi controlada para 25 a 30° C, próxima a temperatura ambiente, para realização dos ensaios. O planejamento para os ensaios foi de 2³, de acordo com o quadro 1.

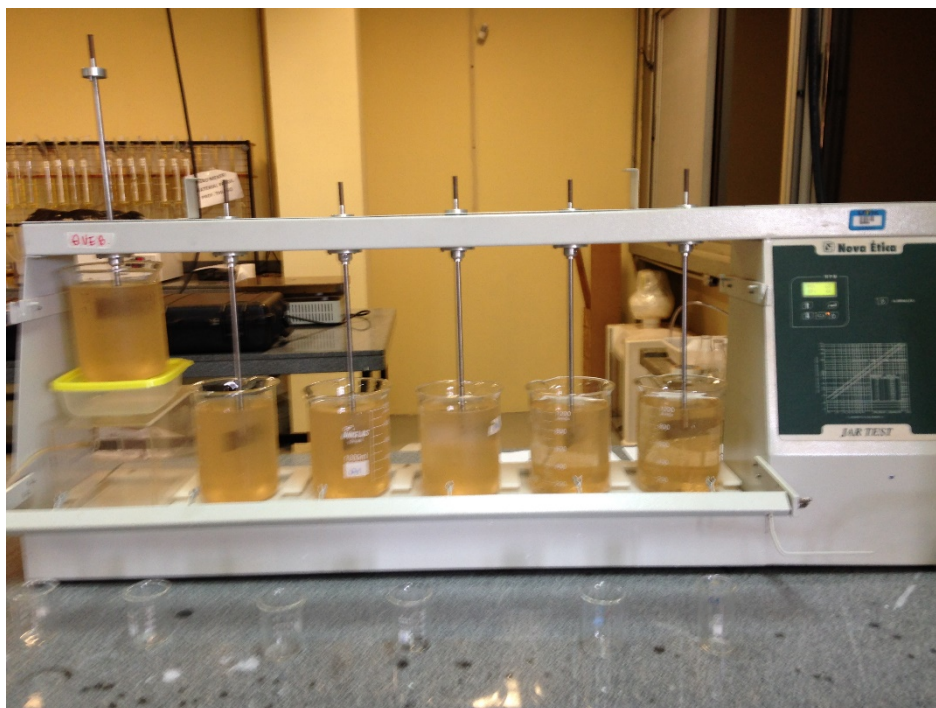


Figura 3 - Jar-test usado para os ensaios de coagulação/floculação.

Ensaio	Massa de semente	Concentração salina	pH
1	1g	0,5 M	7,0
2	1g	1,5 M	7,0
3	2g	0,5 M	7,0
4	2g	1,5 M	7,0
5	1g	0,5 M	11,0
6	1g	1,5 M	11,0
7	2g	0,5 M	11,0
8	2g	1,5 M	11,0

Quadro 1 – Planejamento para os ensaios de tratamento

O pH das amostras foi corrigido para os valores escolhidos através da adição de soluções de ácido clorídrico (1 mol/L) e hidróxido de cálcio (1 mol/L).

As soluções foram adicionadas em jarros contendo 1 L de água bruta, e as soluções dos coagulantes foram usadas em até 3 dias após a extração, sendo usados 1 mL da solução em cada teste. As condições do teste em cada etapa estão descritas do quadro 2 (ŠCIBAN,2010):

Processo	Rotação (rpm)	Tempo (minutos)
Mistura Rápida (MR)	120	1
Mistura Lenta (ML)	60	15
Sedimentação	0	15

Quadro 2 – Condições para o tratamento em *Jar-test*

Os mesmos procedimentos foram feitos para um teste sem coagulantes, chamado de branco.

Após a etapa de sedimentação, foram medidos todos os parâmetros de cor, pH, turbidez, UV_{254} e UV_{272} para comparar com os valores da água bruta e entre as duas sementes escolhidas: moringa e alfarroba. A geração de lodo foi analisada com a utilização de cones Imhoff (Figura 4), em que foi avaliado apenas seu volume gerado. Os resultados foram dispostos através da média obtida das duplicatas.



Figura 4 - Cones Imhoff usados para avaliar a geração de lodo no tratamento.

Os melhores resultados foram observados por maior remoção de cor e turbidez, e maior geração de lodo, o que indica maior eficiência no tratamento.

4.4 ANÁLISE MULTIVARIADA

Na execução do planejamento fatorial, foram feitas todas as possíveis combinações dos níveis de fatores de acordo com uma matriz codificada, em que os valores inferiores assumiram o valor de -1 e os superiores de 1. Foram avaliados os efeitos da concentração salina, quantidade de extrato de semente e pH nos níveis inferiores (0,5M; 1g e 7, respectivamente) e superiores (1,5M; 2g e 11, respectivamente).

Através do software MatLab, a matriz codificada foi analisada, através do método dos Mínimos Quadrados Parciais, para posterior geração de gráficos 3D, indicando os níveis ótimos de pH, extrato de semente e sal a serem usados para obter melhores valores de remoção de cor e turbidez, e geração de lodo.

A partir dos resultados, elaborou-se novos ensaios de coagulação/floculação com as mesmas especificações do quadro 2, com finalidade de avaliar os resultados obtidos, e determinar sua faixa ideal de funcionamento. Os resultados foram avaliados de acordo com a cor e a turbidez.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO DAS SEMENTES

Para quantificar as proteínas presentes nas soluções coagulantes, foram feitas análises das proteínas totais das sementes através do método de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), conforme descrito por Zaia et al (1998) com adaptações. Após encontrar a quantidade de nitrogênio pelo método, o resultado foi multiplicado pelo fator de conversão 6,25, resultando no valor total de nitrogênio em proteínas (mg/L).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA

Os resultados obtidos da caracterização da água bruta estão dispostas na Tabela 1.

Parâmetro	Resultado	Rios Classe 2
pH	6,7	6-9
Cor (UC)	178	-
Turbidez (NTU)	83,7	40-100
UV ₂₅₄	0,281	-
UV ₂₇₂	0,265	-

Tabela 1 – Caracterização da água bruta coletada na Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) de Campo Mourão.

Segundo a resolução CONAMA nº 357/2005, rios com essas características se enquadram na classe 2 de rios doces, o que confere com a classe dada para o Rio do Campo. Esta resolução especifica que rios com essa classe podem ser destinadas para o abastecimento humano, quando submetido a tratamento convencional; à proteção de comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e à aquicultura e à atividade de pesca.

5.2 EXTRAÇÃO DOS COAGULANTES E CARACTERIZAÇÃO DO EXTRATO DAS SEMENTES

Os resultados de UV₂₅₄ e UV₂₇₂ e proteínas totais obtidos para os coagulantes utilizados neste trabalho estão dispostos nas Tabelas 2 (moringa) e 3 (alfarroba).

Solução de coagulantes da moringa	Quantidade de semente(g)	Concentração salina (M)	COD (mg/L)	COT (mg/L)	MOD (mg/l)	Proteínas (mg/ml)
M1	1	0,5	4,38	66,53	1523,61	0,350
M2	1	1,5	4,25	62,47	1421,90	0,210
M3	2	0,5	4,46	68,91	1601,96	0,259
M4	2	1,5	4,42	67,56	1572,39	0,357

Tabela 2 - Caracterização dos coagulantes obtidos a partir de sementes de *Moringa oleifera*.

Solução de coagulantes de alfarroba	Quantidade de semente(g)	Concentração salina (M)	COD (mg/L)	COT (mg/L)	MOD (mg/l)	Proteínas (mg/ml)
A1	1	0,5	4,54	71,42	1669,94	0
A2	1	1,5	4,49	69,88	1656,97	0
A3	2	0,5	4,55	71,58	1683,44	0
A4	2	1,5	4,52	70,85	1676,17	0

Tabela 3 - Caracterização dos coagulantes obtidos a partir de sementes de *Ceratonia siliqua*.

Estes resultados demonstram que a quantidade de matéria orgânica presente nas soluções de moringa e alfarroba pouco se altera, quando submetido às diferentes situações de extração do coagulante, além de demonstrarem similaridade nos resultados entre as duas espécies vegetais.

O resultado mais expressivo é na quantificação de proteínas da solução de sementes de moringa e alfarroba. Na moringa houve quantificação de proteínas retiradas na solução, porém, a solução com alfarroba não apresentou conteúdo proteico nas amostras a partir da metodologia utilizada. Devido à ausência de proteínas na solução da alfarroba, o mecanismo de coagulação deverá ser diferente da moringa, ou seja, outro componente orgânico é responsável pela função.

5.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Três dias após a extração dos coagulantes, os ensaios de coagulação/floculação foram realizados, sendo medidos os parâmetros anteriormente mencionados, tendo como resultado a média das duplicatas, como dispostos nas Tabelas 4 (moringa) e 5 (alfarroba).

Ensaio	Solução	pH Inicial	pH Final	Turbidez (NTU)		Cor (UC)		COD (mg/L)		COD (mg/L)		MOD (mg/L)		Lodo (ml/L)
				Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	M1	6,7	8,3	83,7	9,42	178	30,7	2,45	2,33	6,80	2,88	138,58	41,02	1
2	M2	6,7	7,8	83,7	8,26	178	27,2	2,45	2,32	6,80	2,57	138,58	33,24	1,1
3	M3	6,7	7,4	83,7	6,1	178	20,8	2,45	2,31	6,80	2,25	138,58	25,97	0,6
4	M4	6,7	8,3	83,7	9,2	178	26,1	2,45	2,31	6,80	2,25	138,58	27,01	0,9
5	M1	11,0	10,8	83,7	9,9	178	28,2	2,45	2,31	6,80	2,37	138,58	28,05	0,9
6	M2	11,0	10,8	83,7	10,4	178	29,7	2,45	2,31	6,80	2,27	138,58	27,01	0,7
7	M3	11,0	10,6	83,7	8,2	178	24,4	2,45	2,31	6,80	2,23	138,58	25,97	1,1
8	M4	11,0	10,7	83,7	9,4	178	26,5	2,45	2,31	6,80	2,37	138,58	29,09	0,6
Branco	-	6,7	8,8	83,7	55,6	178	151	2,45	2,45	6,80	6,55	138,58	130,80	0,1

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de *Moringa oleifera* como coagulante

Ensaio	Solução	pH Inicial	pH Final	Turbidez (NTU)		Cor (UC)		COD (mg/L)		COD (mg/L)		MOD (mg/L)		Lodo (ml/L)
				Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	A1	6,7	7,8	83,7	48,9	178,0	138,0	2,45	2,43	6,80	6,17	138,58	121,46	0,2
2	A2	6,7	7,6	83,7	51,1	178,0	142,0	2,45	2,44	6,80	6,25	138,58	124,57	0,3
3	A3	6,7	7,7	83,7	49,0	178,0	139,5	2,45	2,44	6,80	6,37	138,58	128,72	0,2
4	A4	6,7	6,4	83,7	50,6	178,0	140,0	2,45	2,45	6,80	6,55	138,58	131,84	0,4
5	A1	11,0	10,8	83,7	22,2	178,0	68,2	2,45	2,36	6,80	3,99	138,58	68,01	1
6	A2	11,0	10,7	83,7	21,0	178,0	66,5	2,45	2,36	6,80	3,97	138,58	66,45	1
7	A3	11,0	10,8	83,7	12,8	178,0	43,3	2,45	2,33	6,80	3,02	138,58	46,21	1
8	A4	11,0	10,5	83,7	16,6	178,0	56,4	2,45	2,35	6,80	3,67	138,58	61,78	1
Branco	-	6,7	8,8	83,7	55,6	178,0	151,0	2,45	2,45	6,80	6,55	138,58	130,80	0,1

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de *Ceratonia siliqua* como coagulante.

Para melhor avaliação dos dados, as Tabelas 6 e 7 mostram a remoção (em %) de cada um dos parâmetros, demonstrando a eficiência de cada ensaio feito.

Ensaio	Solução	pH inicial	pH final	Remoção de Turbidez	Remoção de Cor	Remoção de COD	Remoção de COT	Remoção de MOD	Lodo (ml/L)
1	M1	6,7	7,3	89%	83%	5,2%	57,7%	70,4%	1
2	M2	6,7	7,2	90%	85%	5,6%	62,1%	76,0%	1,1
3	M3	6,7	7,4	93%	88%	6,0%	66,9%	81,3%	0,6
4	M4	6,7	7,5	89%	85%	6,0%	66,9%	80,5%	0,9
5	M1	11,0	10,8	88%	84%	5,8%	65,1%	79,8%	0,9
6	M2	11,0	10,8	88%	83%	6,0%	66,6%	80,5%	0,7

Ensaio	Solução	pH inicial	pH final	Remoção de Turbidez	Remoção de Cor	Remoção de COD	Remoção de COT	Remoção de MOD	Lodo (ml/L)
7	M3	11,0	10,6	90%	86%	6,0%	67,2%	81,3%	1,1
8	M4	11,0	10,7	89%	85%	5,8%	65,1%	79,0%	0,6
Branco	-	6,7	8,8	34%	15%	0,3%	3,6%	5,6%	0,1

Tabela 6 - Resultados simplificados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de *Moringa oleifera* como coagulante.

Ensaio	Solução	pH Inicial	pH Final	Remoção de Turbidez	Remoção de Cor	Remoção de COD	Remoção de COT	Remoção de MOD	Lodo (ml/L)
1	A1	6,7	7,8	42%	22%	0,8%	9,2%	12,4%	0,2
2	A2	6,7	7,6	39%	20%	0,7%	8,0%	10,1%	0,3
3	A3	6,7	7,7	41%	22%	0,6%	6,2%	7,1%	0,2
4	A4	6,7	6,4	40%	21%	0,3%	3,6%	4,9%	0,4
5	A1	11,0	10,8	73%	62%	3,7%	41,3%	50,9%	1
6	A2	11,0	10,7	75%	63%	3,7%	41,6%	52,0%	1
7	A3	11,0	10,8	85%	76%	5,0%	55,6%	66,7%	1
8	A4	11,0	10,5	80%	68%	4,1%	46,1%	55,4%	1
Branco	-	6,7	8,8	34%	15%	0,3%	3,6%	5,6%	0,1

Tabela 7 - Resultados simplificados dos ensaios de coagulação/floculação com soluções de *Ceratonia siliqua* como coagulante.

Através dos resultados obtidos das soluções de moringa, nota-se que sua eficiência sofreu poucas alterações nos diferentes ensaios realizados, o que indica que seu composto coagulante é flexível para as diversas condições testadas. Em contrapartida, a alfarroba demonstrou dependência do pH, sendo mais eficiente em faixas mais altas de pH.

O pH inicial e final de todos os ensaios demonstram que não houve consumo de alcalinidade, contrário ao que acontece com coagulantes químicos, confirmando o que Richter (2009) estabelece sobre coagulantes orgânicos.

Existem complicações quando coagulantes orgânicos são usados para fazer um tratamento que utiliza cloro como substância de desinfecção, que é a formação de trihalometanos (THM). Estes são compostos cancerígenos, formados a partir da reação da matéria orgânica presente na água com o cloro livre. Para avaliar o potencial de formação destes, foram encontrados os valores de COD, COT e MOD a partir dos resultados de absorvância de UV_{254} e UV_{272} , dispostos nas tabelas 8 e 9.

Ensaio	COT final (mg/L)	COD final (mg/L)	DOM final (mg/L)
1	2,8774	2,326811	41,02261
2	2,5744	2,310486	33,23866
3	2,2512	2,301344	25,97364
4	2,2512	2,30265	27,0115
5	2,3724	2,303956	28,04936
6	2,2714	2,30265	27,0115
7	2,231	2,301344	25,97364
8	2,3724	2,305262	29,08722
Branco	6,5538	2,43325	130,7975

Tabela 8 - COT, COD e MOD proveniente dos resultados com *Moringa oleifera*.

Ensaio	COT final (mg/L)	COD final (mg/L)	DOM final (mg/L)
1	6,17	2,43325	121,4568
2	6,2508	2,435862	124,5703
3	6,372	2,43978	128,7218
4	6,5538	2,445657	131,8354
5	3,9884	2,362726	68,00697
6	3,9682	2,362073	66,45018
7	3,0188	2,331382	46,21191
8	3,6652	2,352278	61,77981
Branco	6,5538	2,445657	130,7975

Tabela 9 - COT, COD e MOD proveniente dos resultados com *Ceratonia siliqua*.

A importância na determinação destes parâmetros se deve pela quantificação de matéria orgânica presente na água e o potencial para a formação THMs. Yang et al. (2015) descreve a alta correlação que o carbono orgânico dissolvido possui com a formação de trihalometanos. O estudo aponta que o coeficiente de correlação entre estes dois parâmetros atingiu 95% em sua pesquisa, sendo possível elaborar uma equação para quantificar o potencial de formação de THMs com a quantidade de DOC presente na água.

Santos et al. (2013) destaca a formação destes compostos em sua pesquisa, usando moringa para o tratamento de água, que tanto a água bruta quanto a tratada do seu experimento não apresentaram potencial para ultrapassar o limite estabelecido pelo Ministério da Saúde, na Portaria 2914/2011, de 100 µg/L. O maior valor verificado por Santos et al (2013) para COD foi de 4,46

mg/L, superior ao da água tratada pelas soluções de moringa e alfarroba, o que indica que o tratamento com estes coagulantes apresenta baixo potencial para formação de THMs.

O carbono orgânico total (COT) é outro parâmetro para relacionar a formação de THMs. KIM (2009) relata em seu estudo que após submeter água bruta ao processo de cloração, com COT máximo de 6,2 mg/L, a formação de THMs também não ultrapassou a valor máximo de 100 µg/L, reforçando a evidência que a água tratada neste estudo não apresenta potencial para ultrapassar este valor.

5.4 ANÁLISE MULTIVARIADA

Através do software Matlab 2016, foi possível obter resultados de concentração salina, massa de semente e pH mais adequados para o tratamento. Para que os dados fossem analisados pelo programa, foi feita uma matriz que relaciona estas condições, indicando assim qual delas tem maior influência no tratamento, podendo ser apenas um ou todos os parâmetros (Quadro 3). Os valores foram codificados para os valores de -1 e +1, onde -1 representa o menor valor, e +1 representa o maior valor escolhido para os parâmetros, com exceção da coluna da média que tem o valor fixo de 1.

Massa de semente	Concentração Salina	pH
1 g	0,5 M	7
1 g	1,5 M	7
2 g	0,5 M	7
2 g	1,5 M	7
1 g	0,5 M	11
1 g	1,5 M	11
2 g	0,5 M	11
2 g	1,5 M	11

Quadro 3 – Matriz codificada para avaliação dos parâmetros significativos no tratamento de água.

5.4.1 Análise dimensional para determinação dos parâmetros significativos no tratamento

Após inserir a matriz no software, os resultados de cada parâmetro são inseridos separadamente, avaliando qual o melhor valor do parâmetro com maior influência nos resultados. Um gráfico (2D) dimensional foi gerado onde o eixo X corresponde aos valores que foram inseridos na matriz (de -1 a +1). O eixo Y mostra o quão significativo é a variável, sendo que valores próximos a zero indicam que resultado do tratamento não depende deste parâmetro.

5.4.1.1 Análise multivariada com os dados obtidos no tratamento *com Moringa oleifera*

Os resultados referentes ao parâmetro com maior influência na remoção de turbidez, cor, UV₂₅₄ e UV₂₇₂ foram introduzidos no *software* Matlab, que gerou coeficientes para formar equações. Os gráficos gerados foram semelhantes (para avaliar os fatores significantes), sendo representado pelo Gráfico 1. Os coeficientes deram origem às Equações 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

$$\text{RM1} = 89,5 + 0,75 * x - 0,5 * y - 0,75 * z - 0,75 * x * y - 0 * x * z + 0,25 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 4})$$

$$\text{RM2} = 84,87 + 1,12 * x - 0,37 * y - 0,37 * z - 0,62 * x * y - 0,12 * x * z - 0,12 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{RM3} = 5,8 + 0,15 * x + 0,05 * y + 0,1 * z + 0,1 * x * y - 0,15 * x * z - 0,05 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{RM4} = 64,7 + 1,82 * x + 0,47 * y + 1,3 * z - 1 * x * y - 1,67 * x * z - 0,62 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 7})$$

$$\text{RM5} = 78,6 + 1,92 * x + 0,4 * y + 1,55 * z - 1,17 * x * y - 1,92 * x * z - 0,8 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{RM6} = 0,86 - 0,06 * x - 0,03 * y - 0,03 * z - 0,01 * x * y + 0,08 * x * z - 0,13 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

RM1= Remoção de turbidez por coagulante extraído de *Moringa oleifera*

RM2= Remoção de cor por coagulante extraído de *Moringa oleifera*

RM3= Remoção de COD por coagulante extraído de *Moringa oleifera*

RM4= Remoção de COT por coagulante extraído de *Moringa oleifera*

RM5= Remoção de MOD por coagulante extraído de *Moringa oleifera*

RM6= Formação de lodo por coagulante extraído de *Moringa oleifera*

x= Massa de semente

y= Concentração salina

z= pH

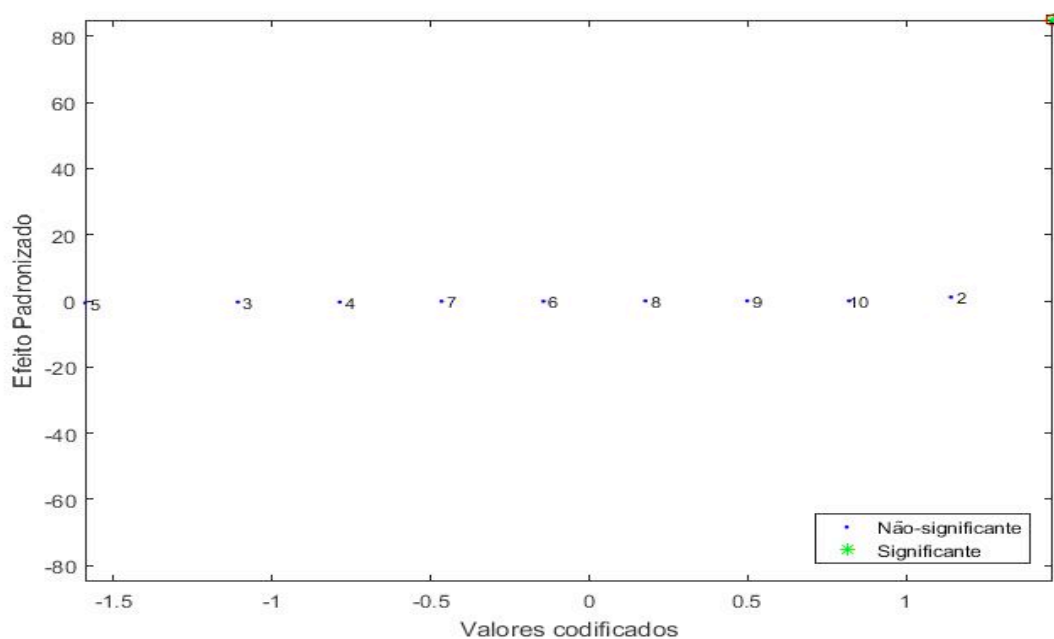


Gráfico 1 - Determinação do fator significativo para a remoção de cor com *Moringa oleifera* como agente coagulante com diferentes valores de massa de semente (x), concentração salina (y) e pH (z) (1=média, 2=x, 3=y, 4=z, 5= x*y, 6= x*z, 7=y*z, 8=x², 9=y², 10= z²).

Ao avaliar o gráfico e as equações, verifica-se que nenhum dos valores utilizados nos ensaios de coagulação demonstrou efeito preponderante na eficiência do tratamento da água bruta, conforme ressaltado anteriormente neste trabalho. As diferenças registradas nos ensaios não são significantes, o que torna o tratamento flexível às condições impostas neste trabalho. Portanto,

quaisquer valores de pH, concentração salina e massa de semente podem ser adotados como condições de eficiência ideal para o coagulante, e nesse caso serão utilizados os valores inferiores a fim de usar menor quantidade de material, ou seja: pH de 7 (natural), concentração de sal de 0,5 M e massa de semente de 1 grama.

5.4.1.2 Análise multivariada com os dados obtidos no tratamento com *Ceratonia siliqua*

Em relação ao uso da alfarroba como coagulante, os resultados referentes ao parâmetro significativo para remoção de turbidez, cor, UV₂₅₄, UV₂₇₂, e formação do lodo determinaram os coeficientes para as equações 10, 11, 12, 13, 14 e 15, gerando gráfico, representado pelo Gráfico 2

$$RA1 = 59,37 + 2,12 * x - 0,87 * y + 18,87 * z - 0,62 * x * y + 2,12 * x * z - 0,12 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 10})$$

$$RA2 = 44,25 + 2,5 * x - 1,25 * y + 23 * z - 1 * x * y + 2,25 * x * z - 0,5 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 11})$$

$$RA3 = 2,36 + 0,13 * x - 0,16 * y + 1,75 * z - 0,13 * x * y + 0,28 * x * z - 0,06 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 12})$$

$$RA4 = 26,45 + 1,42 * x - 1,62 * y + 19,7 * z - 1,4 * x * y + 3,27 * x * z - 0,67 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 13})$$

$$RA5 = 32,43 + 1,08 * x - 1,83 * y + 23,8 * z - 1,5 * x * y + 3,71 * x * z - 0,71 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 14})$$

$$RA6 = 0,64 + 0,01 * x + 0,03 * y + 0,36 * z + 0,01 * x * y - 0,01 * x * z - 0,03 * y * z + 0 * x^2 + 0 * y^2 + 0 * z^2 \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

RA1= Remoção de turbidez por coagulante extraído de *Ceratonia siliqua*

RA2= Remoção de cor por coagulante extraído de *Ceratonia siliqua*

RA3= Remoção de COD por coagulante extraído de *Ceratonia siliqua*

RA4= Remoção de COT por coagulante extraído de *Ceratonia siliqua*

RA5= Remoção de MOD por coagulante extraído de *Ceratonia siliqua*

RA6= Formação de lodo por coagulante extraído de *Ceratonia siliqua*

x= Massa de semente

y= Concentração salina

z= pH

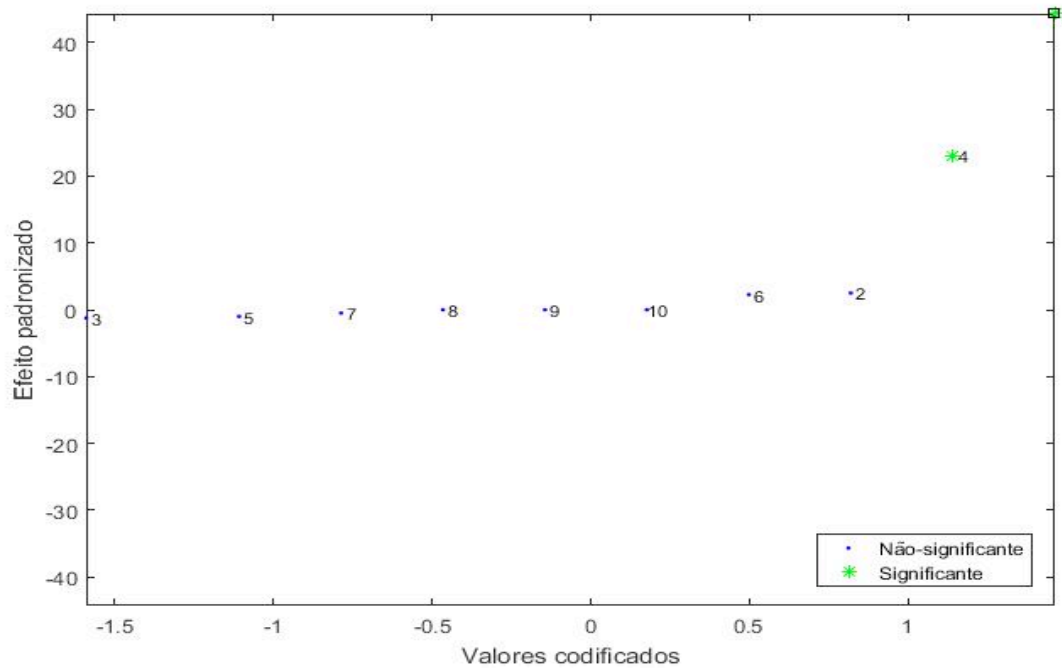


Gráfico 2 - Determinação do fator significativo para a remoção de cor com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante com diferentes valores de massa de semente (x), concentração salina (y) e pH (z) (1=média, 2=x, 3=y, 4=z, 5= x*y, 6= x*z, 7=y*z, 8=x², 9=y², 10= z²)

Diferente dos resultados da moringa, a variação do pH foi significativa para o tratamento de água com alfarroba. Isto indica que os valores adotados de pH, 7 e 11 influenciam o tratamento de água ao usar este coagulante. O resultado foi melhor para o valor mais alto adotado, pois o ponto que representa o pH no gráfico (ponto 4) se encontra superior a zero, além das equações apontarem que o coeficiente ligado ao pH possui valor elevado, demonstrando sua significância.

As concentrações salinas e massa de semente usadas não apresentaram efeito na eficiência do tratamento, portanto, os valores mais baixos escolhidos podem ser usados para preparar a solução de coagulante, com a mesma finalidade de reduzir a quantidade de material.

5.4.2 Análise tridimensional para avaliação dos parâmetros significativos no tratamento

Após a construção dos gráficos anteriores (1 e 2), gerou-se novos gráficos tridimensionais que mostram qual o melhor valor para o parâmetro apontado para avaliação de parâmetro significativo, feito no passo anterior. Nesse novo gráfico, apenas dois dos três parâmetros são avaliados. Portanto, o parâmetro que não é usado deve ser aquele que se mostra indiferente nos resultados.

5.4.2.1 Análise para *Moringa oleifera*

Para reforçar os resultados obtidos, foram elaborados gráficos em 3 dimensões para demonstrar os efeitos das condições estabelecidas na eficiência do tratamento. Em virtude dos resultados dependerem da concentração salina, massa de semente e pH, e considerando que o gráfico só poder usar duas variáveis para relacionar aos resultados, foram usados a concentração salina e massa de semente para gerar o gráfico para avaliar o desempenho do coagulante. Os gráficos para remoção de turbidez, cor, COD, COT, MOD e formação de lodo às condições anteriormente descritas estão dispostas nos gráficos 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

Nota-se que os gráficos demonstram pouca diferença em todos os valores avaliados de massa de semente e concentração salina, ou seja, o intervalo de valores avaliados das duas condições possuem pouca influência no resultado final. Portanto, tanto o extremo inferior quanto o superior podem ser usados para o tratamento.

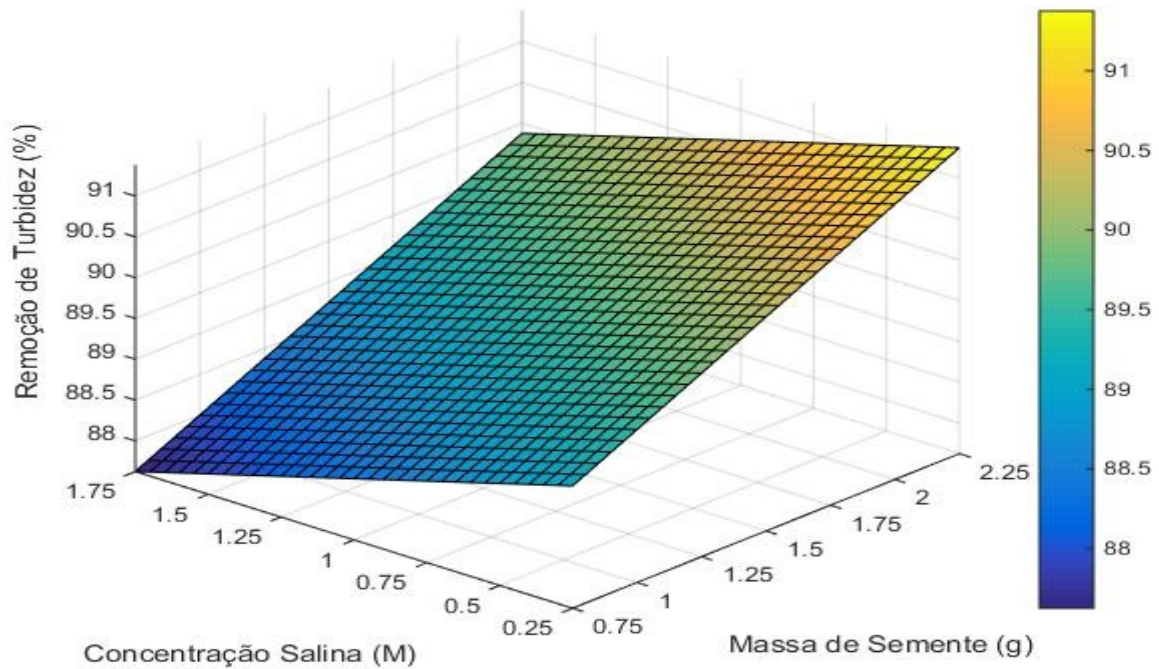


Gráfico 3 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de turbidez com *Moringa oleifera* como agente coagulante.

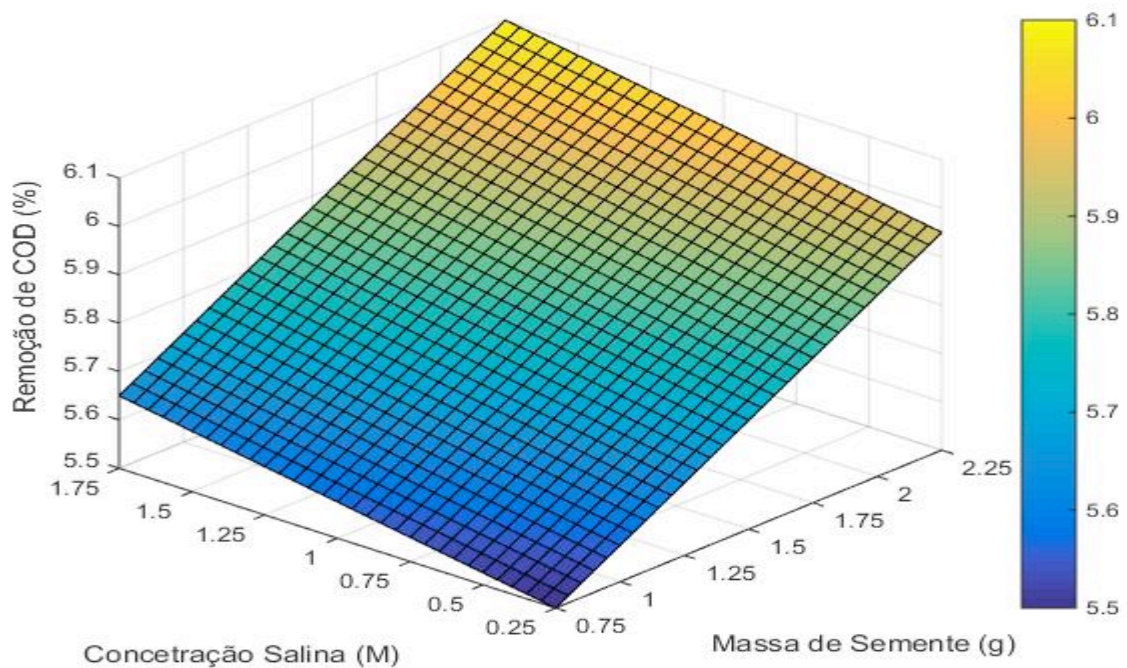


Gráfico 4 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de cor com *Moringa oleifera* como agente coagulante.

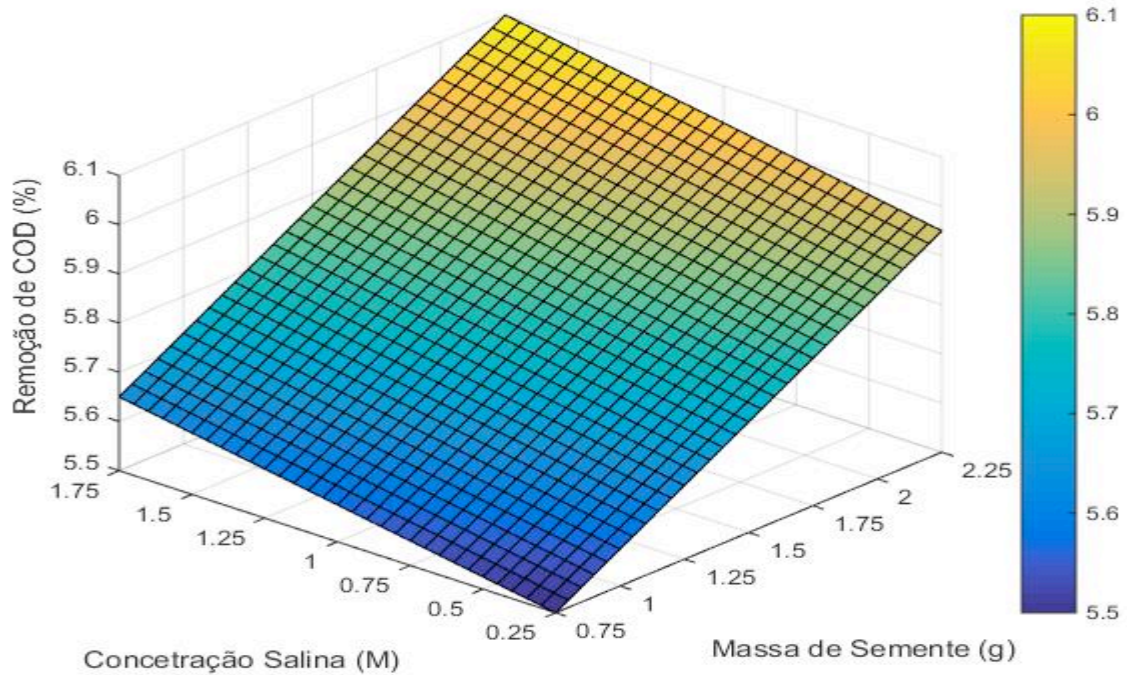


Gráfico 5 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COD com *Moringa oleifera* como agente coagulante.

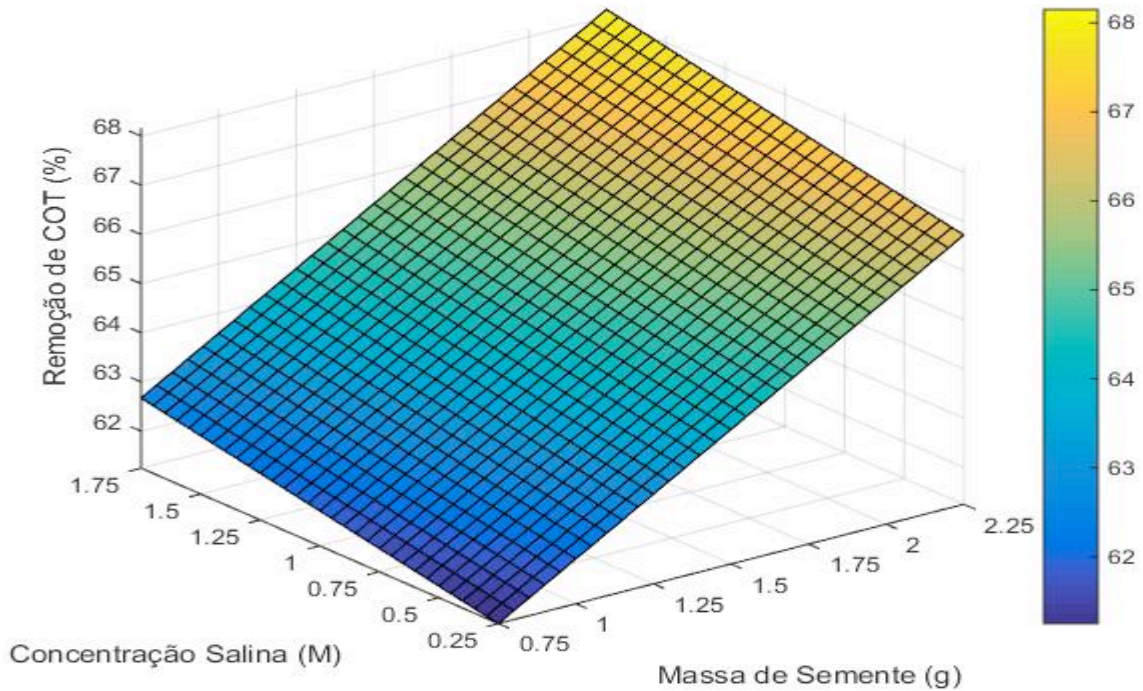


Gráfico 6 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COT com *Moringa oleifera* como agente coagulante.

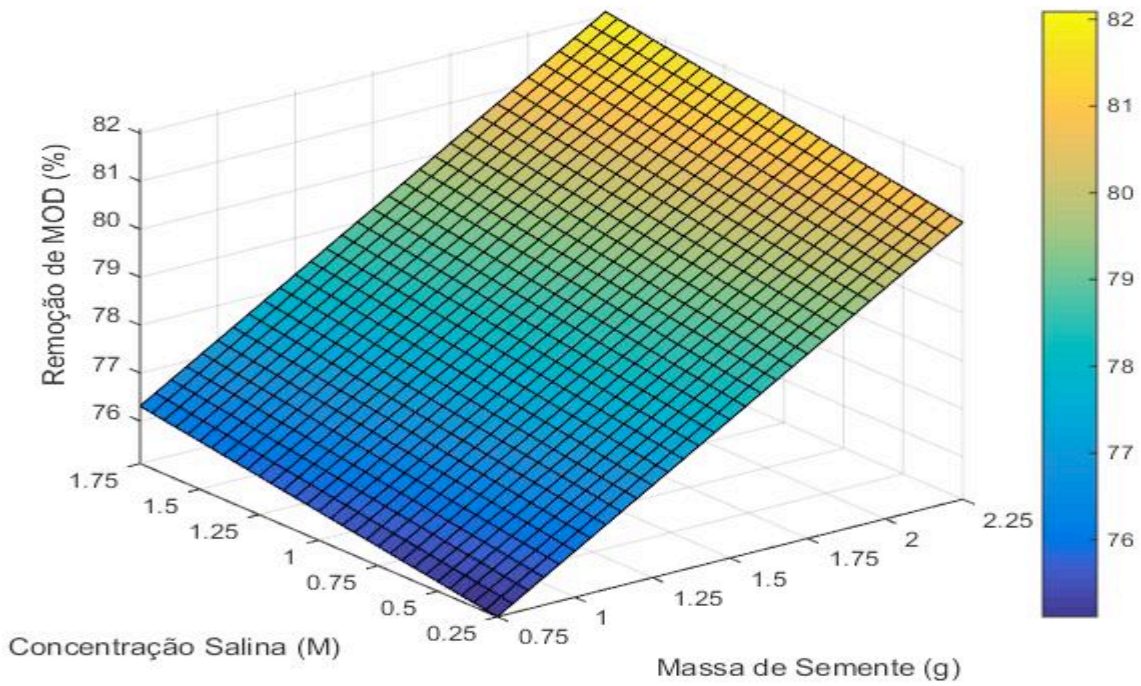


Gráfico 7 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de DOM com *Moringa oleifera* como agente coagulante.

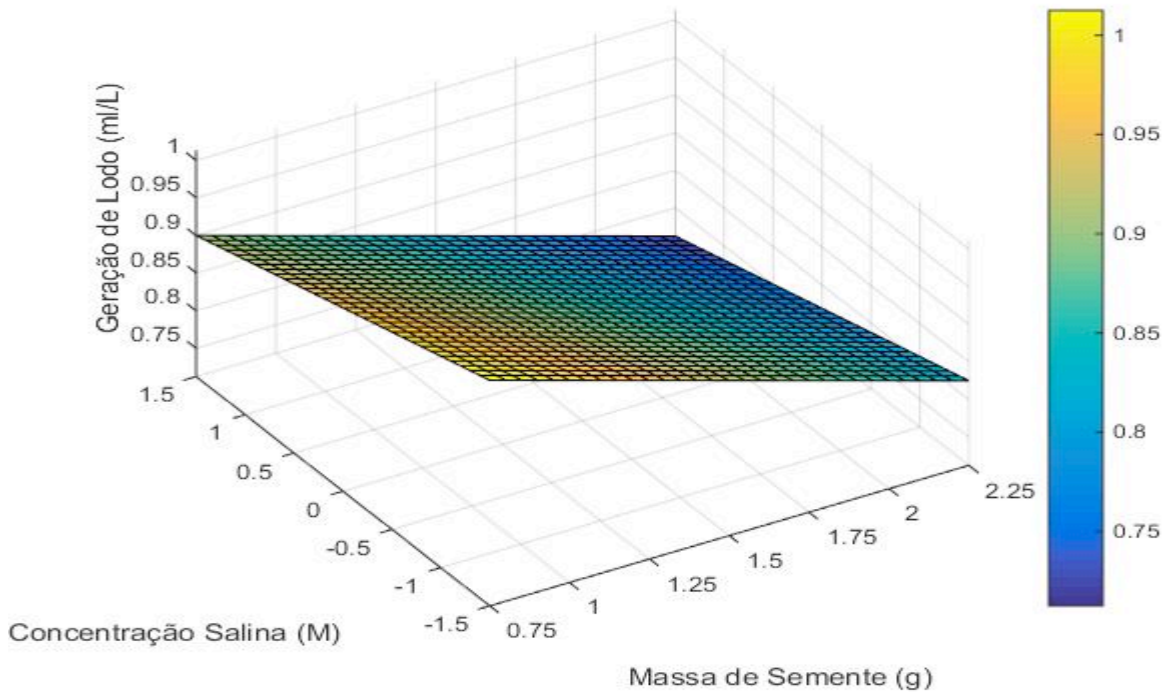


Gráfico 8 - Avaliação de parâmetros significativos na formação de lodo com *Moringa oleifera* como agente coagulante.

5.4.2.2 Análise para *Ceratonia siliqua*

Em contraste com a moringa, o pH foi significativo para a aplicação da solução coagulante de alfarroba no tratamento de água. Os outros fatores não interferiram no resultado, o que demonstra que a extração do agente coagulante não dependeu de concentração salina e quantidade de massa da semente. Como relatado anteriormente, o gráfico tridimensional necessita de duas variáveis para relacionar com o resultado, portanto foi escolhido a quantidade de semente (não-significante) e pH (significante). Os gráficos que relacionam as variáveis escolhidas com a remoção de turbidez, cor, COD, COT, DOM e formação de lodo estão dispostas nos gráficos 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente.

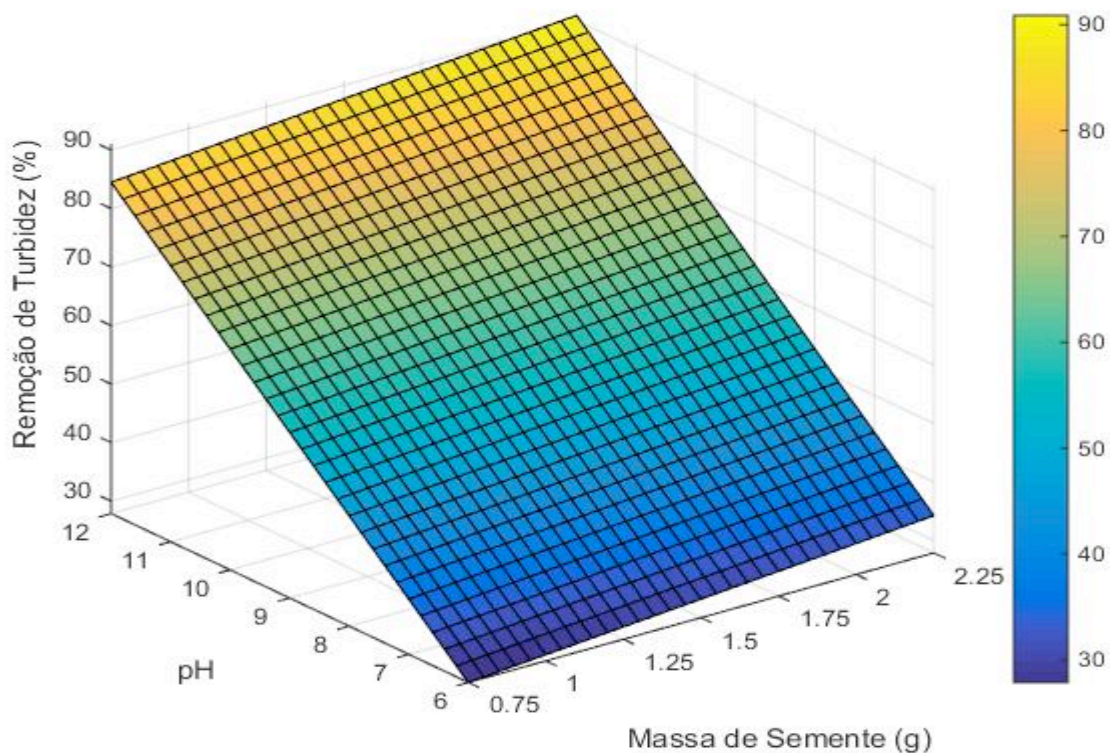


Gráfico 9 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de turbidez com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

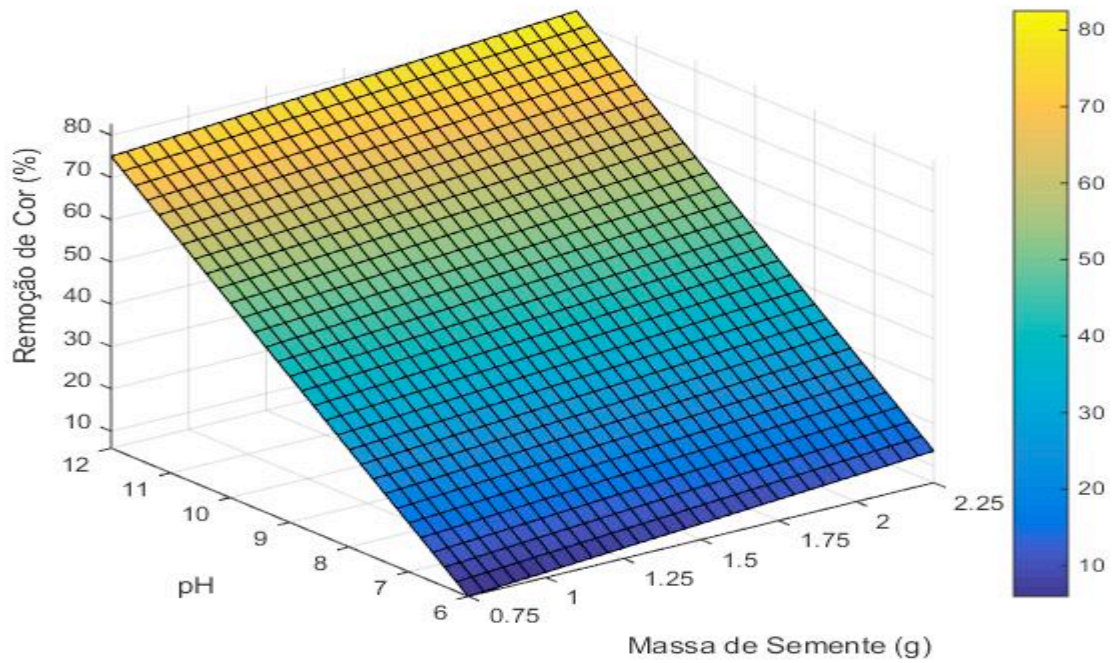


Gráfico 10 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de cor com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

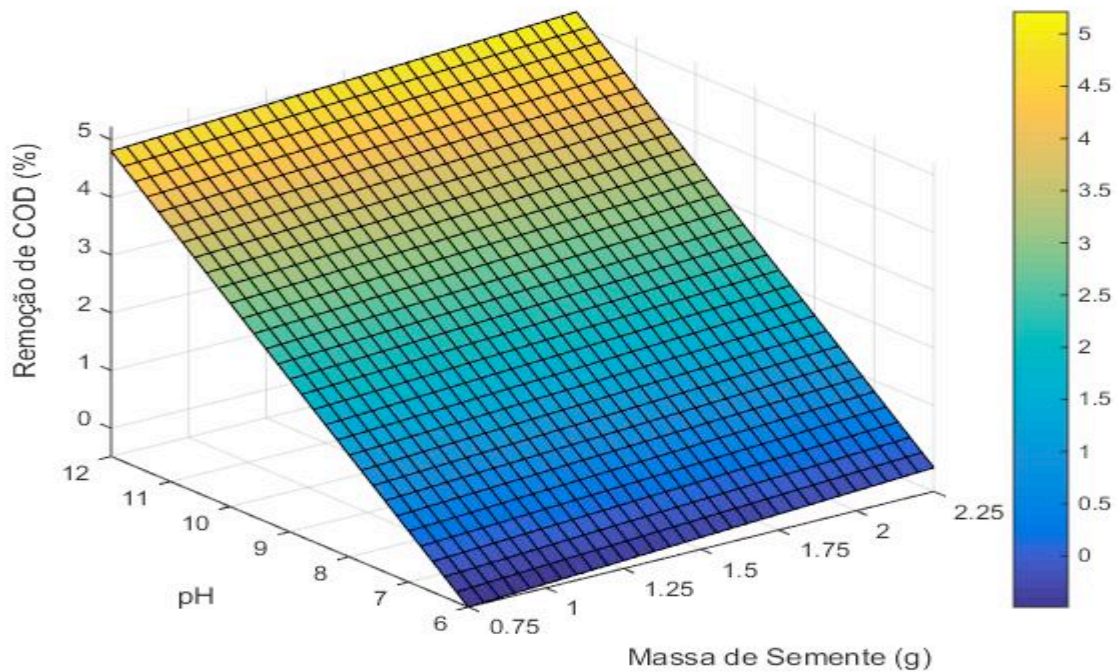


Gráfico 11 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COD com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

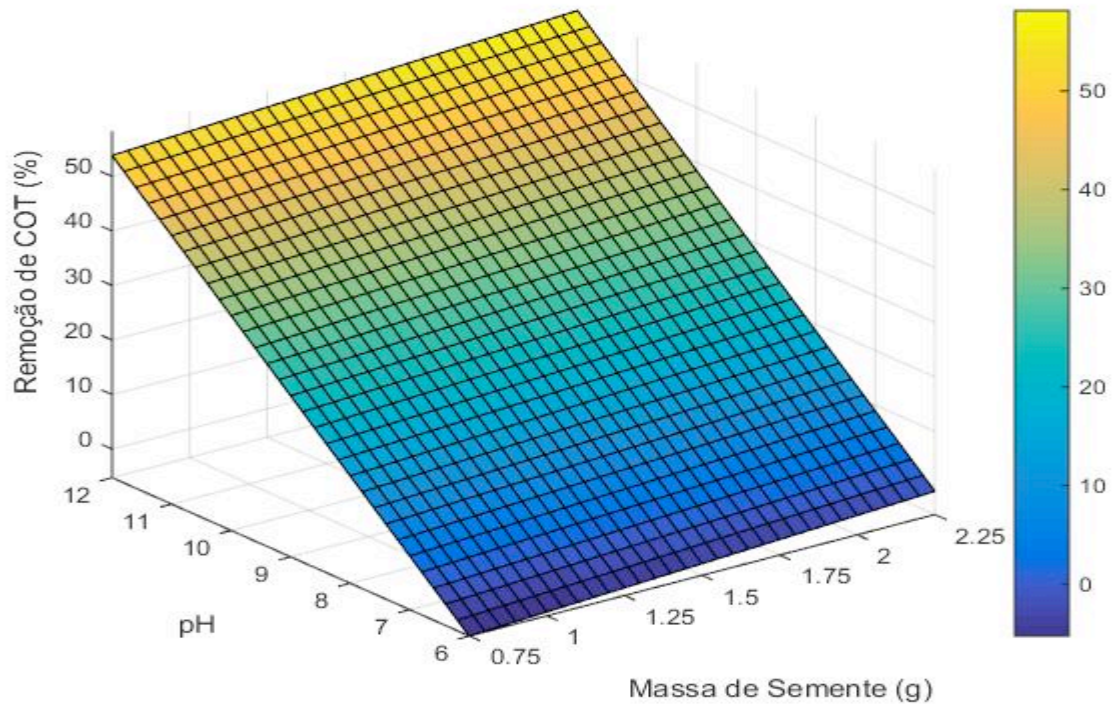


Gráfico 12 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de COT com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

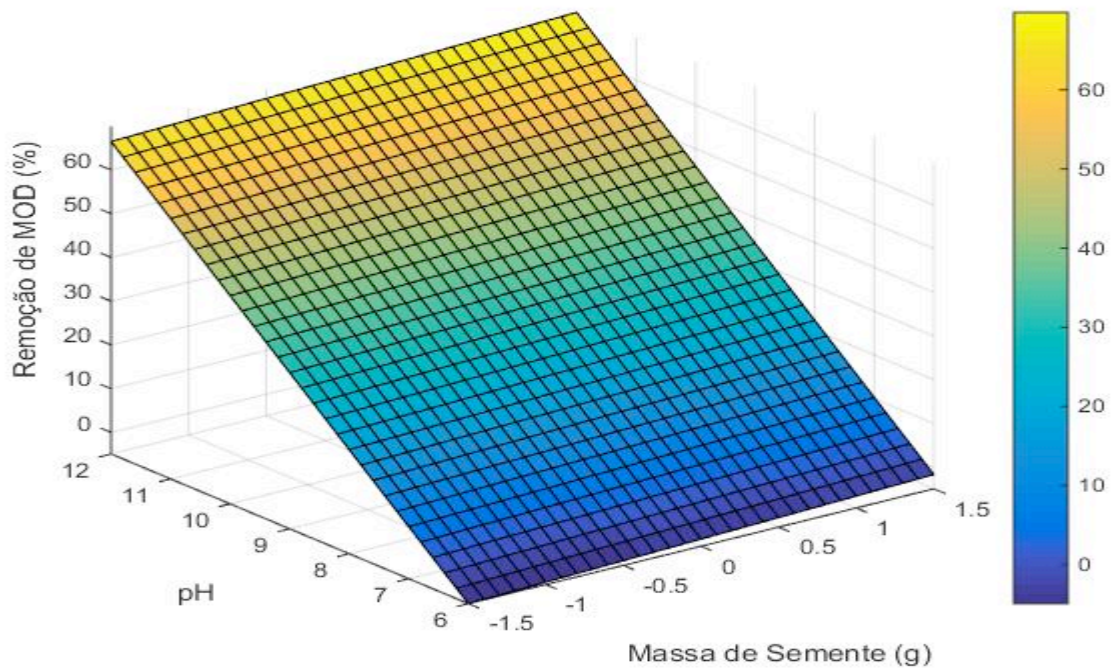


Gráfico 13 - Avaliação de parâmetros significativos na remoção de MOD com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

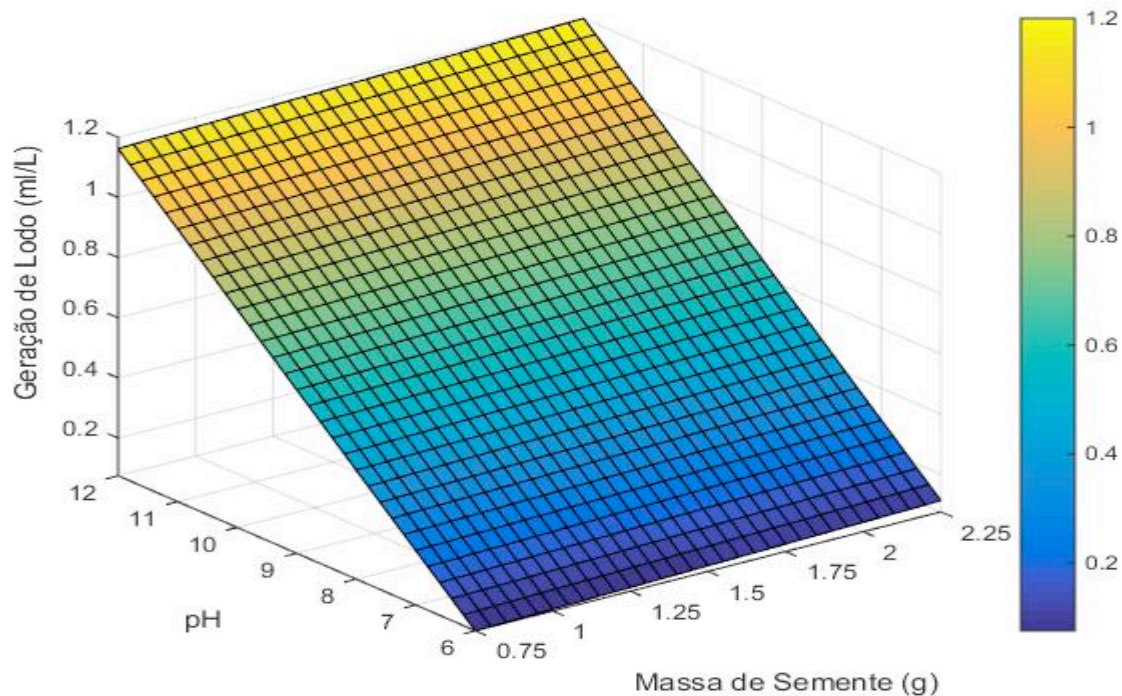


Gráfico 14 - Avaliação de parâmetros significativos na formação de lodo com *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

Assim como demonstrado anteriormente, a massa de semente usada para preparar o coagulante pouco afetou o resultado, porém o pH demonstrou ser principal fator para o tratamento mais eficiente. O valor mais elevado do pH foi indicado como ideal para obter a maior eficiência, demonstrando que quanto maior o pH, melhor o resultado a ser obtido.

Os gráficos do coagulante da alfarroba sugerem que seus resultados melhorem conforme o pH se eleva, porém, coagulantes químicos e orgânicos possuem eficiência em faixas de pH (RICHTER, 2009), não sendo específicos de um ideal, o que torna provável que este também tenha o mesmo comportamento.

5.5 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO PARA O FATOR SIGNIFICATIVO

Por meio dos resultados anteriores, conclui-se que o fator mais influente para o tratamento de água com alfarroba é o pH. Com finalidade de determinar a faixa de pH ideal para aplicação

deste coagulante, foram feitos ensaio de coagulação/floculação com outros valores de pH (Tabela 9). A solução coagulante de moringa também foi testada, apesar de não sofrer influência deste parâmetro (Tabela 10).

Ensaio	pH	Turbidez		Cor	
		Inicial	Final	Inicial	Final
1	4	70,6	36,1	147	108
2	6	70,6	42,2	147	121
3	8	70,6	33,9	147	109
4	10	70,6	39,9	147	115
5	12	70,6	9,3	147	23,3

Tabela 10 - Resultados dos ensaios da solução *Ceratonia siliqua* como agente coagulante.

Ensaio	pH	Turbidez		Cor	
		Inicial	Final	Inicial	Final
1	4	70,6	25,7	147	80
2	6	70,6	7,2	147	27,5
3	8	70,6	9,5	147	29,6
4	10	70,6	7,4	147	26,8
5	12	70,6	9,7	147	13,9

Tabela 11 - Resultados dos ensaios da solução *Moringa oleifera* como agente coagulante.

Os resultados demonstram que a alfarroba apresenta maior eficiência em valores elevados de pH. Com os resultados anteriores, nota-se que houve redução de cor e turbidez a partir do pH com valor 11 (ver Tabela 5), o que implica que a faixa de eficiência em remoção é maior ou igual a 11, mas não pode ser afirmado que este coagulante é eficiente no valor máximo de pH (14), pois o ensaio não foi realizado. Em faixas de pH ácido, o coagulante não foi eficiente.

Em relação ao coagulante extraído da moringa, houve remoção de cor e turbidez significativa a partir do pH 6, comum em corpos hídricos. Este coagulante se mostrou eficiente em um amplo intervalo de pH, obtendo maior remoção de cor quando o pH foi elevado para níveis mais altos, como mostra o ensaio 5 do quadro 12.

Um dos diferenciais dos coagulantes orgânicos é ausência na redução da alcalinidade (RICHTER, 2009), o que o torna atrativo por não necessitar de adição de alcalinizantes. Porém, a

solução com coagulante de alfarroba não apresenta esse diferencial, pois, apesar de não consumir alcalinidade, necessita de uma quantidade não presente naturalmente na água bruta. Outro fator agravante é a necessidade de ácidos para a correção do pH para o padrão adequado de potabilidade, ou seja, haveria necessidade de alterar o pH duas vezes antes de fornecer a água para o abastecimento público.

Devido ao consumo de alcalinidade dos coagulantes químicos, os coagulantes extraídos da alfarroba podem ser usados em conjunto. Esta associação pode reduzir a quantidade de metais pesados presentes no lodo, além de diminuir a necessidade de correção de pH no final do tratamento.

O tratamento com ambas as espécies vegetais não foram suficientes para a redução de cor e turbidez. Segundo a Portaria 2914/2011, do Ministério da Saúde, o Valor Máximo Permitido (VMP) de turbidez após tratamento convencional completo é de 0,5 NTU, e nenhum dos ensaios realizados neste trabalho atingiu este padrão. Para atender ao padrão de qualidade exigido pelo Ministério da Saúde, o tratamento necessita de uma extensão em seu tratamento, como filtros capazes de retirar a turbidez excedente da água.

O gráfico 13 e 14 demonstra o comparação dos dois coagulantes, na remoção de cor e turbidez, respectivamente.

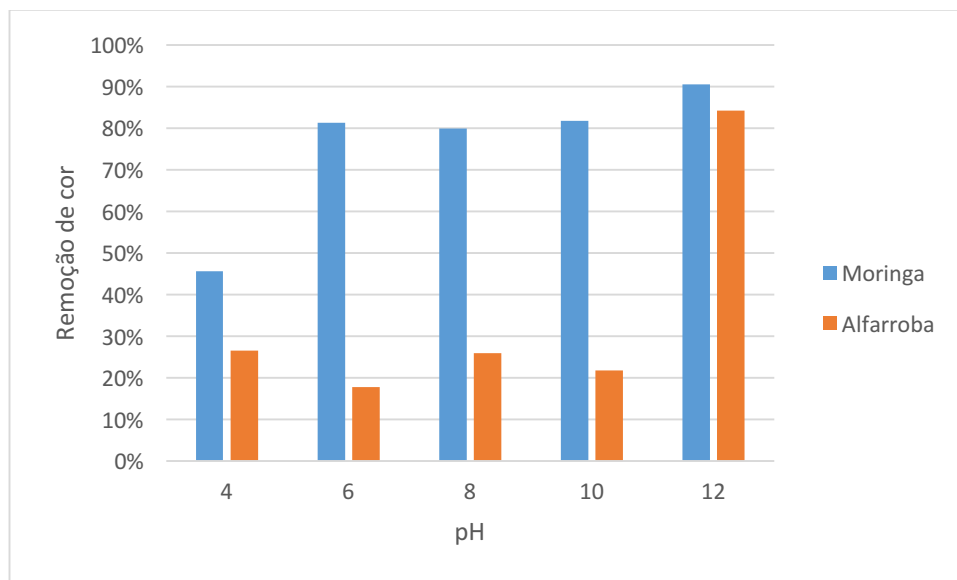


Gráfico 15 - Remoção de cor por *Moringa oleifera* e *Ceratonia siliqua*.

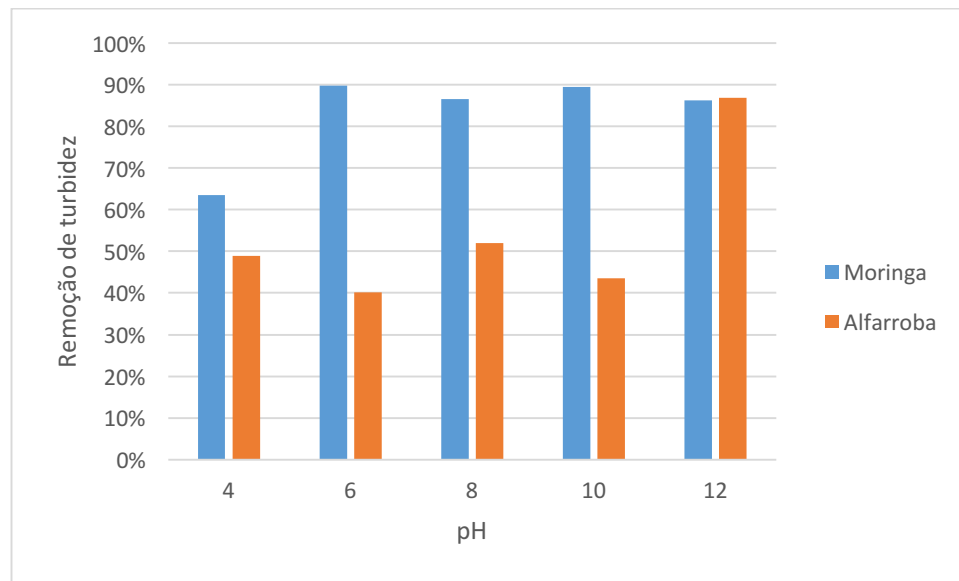


Gráfico 16 - Remoção de cor por *Moringa oleifera* e *Ceratonia siliqua*.

Quando comparado com a moringa, a alfarroba mostra eficiência semelhante em pH maior que 11. Todavia, a moringa demonstra desempenho superior na faixa de pH 4 a 10, apresentando alta remoção nos parâmetros avaliados. Nota-se ainda que no maior pH testado, há um salto na remoção de cor com moringa, o que torna possível a existência de outro componente orgânico atuando como coagulante.

Segundo a Tabela 3, as soluções de moringa e alfarroba se diferenciam em seu valor proteico. Diversos estudos relacionam as proteínas existentes na moringa como fator principal para explicar sua atividade coagulante. A alfarroba se diferencia pela ausência de proteínas e efetividade somente em pH elevado. Outras estruturas moleculares presentes na alfarroba, que apresentam potencial coagulante, são os polissacarídeos. Estas estruturas são biopolímeros, carboidratos, encontrados de diversas formas na natureza (BORGES et al., 2004).

Omar et al. (200-?) descreve em seu estudo que o uso de amido (um polissacarídeo) de milho, de sagu e de arroz promove remoção superior a 95% da turbidez de efluentes de semicondutores quando há controle de pH em 12. Nesta faixa de pH, o coagulante extraído da alfarroba obteve melhores resultados, indicando que o mecanismo de coagulação do amido usado por Omar et al. (200-?) é similar ao da alfarroba.

Oladoja (2015) descreve sobre espécies do gênero *Opuntia*, que são capazes de produzir mucilagem, um carboidrato hidrocolóide capaz de exercer efeito coagulante no tratamento de água

ou efluente. Em pH 10, este composto pôde realizar redução de 98% no tratamento de água, preparada com argila para o estudo (Miller et al, 2008).

Portanto, há fortes evidências que o mecanismo de coagulação exercido pela solução de alfarroba é proveniente de polissacarídeos. Devido a especificidade da atuação deste composto orgânico, seu uso em tratamento de água bruta se torna inviável.

Entretanto, a solução de alfarroba tem potencial para ser usado em efluentes industriais com características alcalinas. De acordo com Almeida (2002), a indústria de papel e celulose contem processos de branqueamento da celulose, onde há adição de produtos químicos alcalinos, produzindo efluente com pH 11, aproximadamente. O coagulante usado nestas indústrias é de origem química, sendo o sulfato de alumínio o principal.

Indústrias que usam coagulantes químicos possuem maior dificuldade na disposição do lodo gerado do tratamento, devido à sua alta composição metálica. Portanto, o uso de polímeros orgânicos pode facilitar o tratamento do lodo, tornando-o menos poluente.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que a quantidade de proteínas presentes nas soluções coagulantes de alfarroba e moringa indicam diferença no mecanismo de coagulação da água bruta. Enquanto a moringa possui proteínas como agentes coagulantes, a alfarroba possui indicadores que polissacarídeos atuam neste processo.

Analisando os valores de COT, COD e MOD, e comparando com outros estudos, pode ser observado baixo potencial de ambos os tipos de coagulantes na formação de trihalometanos. Esse componente altamente cancerígeno não tem potencial de formação para superar o valor máximo permitido de 100 µg/L, estabelecido pela portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

A *Moringa oleifera* apresentou alta flexibilidade para o tratamento efetivo nas condições estabelecidas por este estudo, obtendo remoção de turbidez de até 93% nos ensaios com *Jar-test*. Os resultados foram eficientes em condições naturais da água bruta, o que o torna atrativo por não necessitar de alcalinizantes para a correção do pH.

Em contrapartida, a *Ceratonia Siliqua* apresentou poder coagulante apenas em valores elevados de pH. Os ensaios que obtiveram êxito na remoção de cor e turbidez foram nas faixas de pH 11 e 12. Esta especificidade dificulta seu uso em tratamento de água por não ser comum a presença de fontes naturais com valores elevados de pH. Entretanto, o tratamento de efluentes pode ser possível pela diversidade de atividades industriais existentes. A indústria de papel e celulose produz efluentes alcalinos, devido ao processo de branqueamento da celulose.

Em suma, os dois coagulantes apresentaram semelhança no tratamento de água em valores de pH elevados, porém, a moringa foi superior para os ensaios com pH menor que 11.

Apesar de não cumprir o valor máximo permitido de turbidez estabelecido pelo Ministério da Saúde (0,5 NTU), os coagulantes orgânicos testados neste trabalho apresentaram alta eficiência (remoção de turbidez de até 93%), quando efetuado em condições ótimas, tendo potencial para ser usados para outros fins, como o tratamento de efluente. O tratamento testado neste estudo não considerou a remoção de impurezas remanescentes na etapa de filtração, que compõem parte fundamental do tratamento de corpos de águas superficiais.

Visando o cumprimento da legislação e a distribuição de água adequada à população, os coagulantes extraídos da alfarroba podem ser usados em conjunto com coagulantes químicos. Esta

associação pode reduzir a quantidade de metais pesados presentes no lodo, facilitando sua destinação final, além de diminuir a necessidade de correção de pH no final do tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, K. M. de. **Tratamento do efluente alcalino do branqueamento da polpa de celulose pelo processo de separação por membranas**. 2002. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

BAPTISTA, A. T. A.; COLDEBELLA, P. F.; CARDINES, P. H. F.; GOMES, R. G.; VIEIRA, M. F.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, A. M. S. Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleifera* for the treatment of surface water. **Chemical Engineering Journal**, 276, p. 166-173. Elsevier, 2015.

BITTENCOURT, C.; PAULA, M. A. S. de. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2014.

BONDY, S. C. The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue. **Neurotoxicology**, p. 575-581. Elsevier, 2010.

BONNER, F. T.; KARRFALT, R. P. **The woody plant seed manual: agriculture handbook 727**. United States Department of Agriculture: Forest Service. 2008.

BORGES, C. D.; MOREIRA, Â. N.; MOREIRA, A. da S.; DEL PINO, F. A. B.; VENDRUSCOLO, C. T. Caracterização de biopolímeros produzidos por *Beijerinckia* sp. 7070 em diferentes tempos de cultivo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24(3), p. 327-332, setembro de 2004.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2013**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014.

CRUZ, J. G. H. **Alternativas para a aplicação de coagulante vegetal à base de tanino no tratamento do efluente de uma lavanderia industrial**. 2004. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DEFLANDRE, B.; GAGNÉ, J. Estimation of dissolved organic carbon (DOC) concentrations in nanoliter samples using UV spectroscopy. **Elsevier – Water Research**, vol. 35, issue 13, pg. 3057-3062, set. 2001. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135401000240>>. Acesso em 15 de maio de 2016.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2002.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. di B. **Métodos e técnicas de tratamento de água** (vol. 1) . 2ª Ed. São Paulo: RiMa, 2005.

EDZWALD, J. K.; KAMINSKI, G. S. A practical method for water plants to select coagulant dosing. **Journal New England Water Works Association** – NEWWA, 2009. Disponível em <<http://www.cec-online.com/site/technical/coagdose.pdf>>. Acesso em 10 de maio de 2016.

FRANCO, E. S. **Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água**. 2009. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GENSEMER, R. W.; PLAYLE, R. C. The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, p. 315-450, 1999.

KHAN, S.; YAOGUO, W.; XIAOYAN, Z.; JINGTAO, L.; JICHAO, S. J.; SIHAI, H. **Estimation of concentration of dissolved organic matter from sediment by using UV-visible spectrophotometer**. **International Journal of Environmental Pollution and Remediation**, vol. 2. Department of Applied Chemistry, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, 2014.

KIM, J. Fate of THMs and HAAs in low TOC surface water. **Environmental Research**, v. 109 (2), p. 158-165, 2009. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393510800251X>>. Acesso em 24 de maio de 2016.

LEGNER, C. Sistema de decantação. **Revista TAE – Tratamento de água & efluentes**. 2013. Disponível em <http://www.opersan.com.br/images/pdf/tae_sistema_de_decantacao.pdf>. Acesso em 6 de novembro de 2015.

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

MACÊDO, J. A. B. de. **Águas e Águas**. Juiz de Fora-MG: ORTOFARMA, 2000.

MADRONA, G. S.; BRANCO, I. G.; SEOLIN, V. J.; ALVES FILHO, B. de A.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; BERGAMASCO, R. Evaluation of extracts of *Moringa oleifera* Lam seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment. **Acta Scientiarum**. Maringá: UEM- Universidade Estadual de Maringá, 2012.

MILLER, S. M.; FUGATE, E. J.; CRAVER, V. O.; SMITH, J. A.; ZIMMERMAN, J. B. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. **Environmental Science & Technology**, vol. 42, pg. 4274–4279, 2008.

MIWA, A. C. P. **Comparação e avaliação dos métodos colorimétricos utilizados para determinação de proteínas em lagoas de estabilização**. 2003. 133 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NISHI, L.; MADRONA, G. S.; VIEIRA, A. M. S.; BASSETTI, F. J.; Silva, G. F.; BERGAMASCO, R. Coagulação/floculação com sementes de *Moringa oleifera* Lam para remoção de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. da água. **3rd International Workshop – Advances in Cleaner Production**. São Paulo, 2011.

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

OMAR, F. M.; TOW, T. T.; ISMAIL, N.; RAHMAN, N. N. N. A. **Treatment of semiconductor wastewater by natural coagulants: corn, sago and rice flour using response surface methodology**. Universiti Sains Malaysia, Malaysia, 200-?. Disponível em <http://eprints.usm.my/4904/1/Treatment_Of_Semiconductor_Wastewater_By_natural_Coagulants_Corn_Sago_And_Rice_Flour_Using_Response_Surface_Methodology.pdf>. Acesso em 22 de maio de 2016.

PIANTÁ, C. A. V. **Emprego de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água**. 2008. 78 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. de A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.

RONDEAU, V.; COMMENGES, D.; JACQMIN-GADDA, H.; DARTIGUES, J. Relation between aluminum concentrations in drinking water and alzheimer's disease: an 8-year follow-up study. **American Journal of Epidemiology**, v. 152, n. 1, 2000

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GHEBREMICHAEL, K. BELTRÁN-HEREDIA, J. Comparison of single-step and two-step purified coagulants from *Moringa oleifera* seed for turbidity and DOC removal. **Bioresource Technology**, 101, p. 6259-6261. Elsevier, 2010.

SANTOS, T. R. T. dos; VALVERDE, K. C.; NISHI, L.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, M. F. Estudo da formação de thalometanos no processo de coagulação/floculação/adsorção em carvão ativado vegetal com o coagulante natural *Moringa oleifera* Lam para tratamento de água de abastecimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 5, nº 3, 2013.

ŠĆIBAN, M. B.; KLAŠNJA, M. T.; STOJIMIROVIĆ, J. L.. Investigation of coagulation activity of natural coagulants from seeds of different leguminose species. **Acta Periodica Technologica - APTEFF**, 36, 1-266. 2005.

ŠĆIBAN, M. B.; VASIĆ, M. A.; PRODANOVIĆ, J. M.; ANTOV, M. G.; KLAŠNJA, M. T. The investigation of coagulation activity of natural coagulants extracted from different strains of common bean. **Acta Periodica Technologica - APTEFF**, 41, 1-203. 2010.

VANACÔR, R. N. **Avaliação do coagulante orgânico *veta organic* utilizado em uma estação de tratamento de água para abastecimento público**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

WESTPHAL, K. S.; CHAPRA, S.; SUNG, W. Modeling TOC and UV-254 absorbance for reservoir planning and operation. **Journal of the American Water Resources Association**, 2004. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/229492717_Modeling_TOC_and_UV-254_absorbance_for_reservoir_planning_and_operation>. Acesso em 10 de maio de 2016.

YANG, L.; KIM, D.; UZUN, H.; KARANFIL, T.; HUR, J. Assessing trihalomethanes (THMs) and N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potentials in drinking water treatment plants using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis. **Chemosphere**, v. 121, p. 84-91, 2015. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653514013514>>. Acesso em 24 de maio de 2016.

ZAIA, D. A. M.; ZAIA, C. T. B. V.; LICHTIG, J. Determinação de proteínas totais via espectrofotometria: vantagens e desvantagens dos métodos existentes. **Química Nova**, 21 (6), p. 787-793, 1998