



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



Karen Campos Rodrigues

OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA
ASSOCIANDO SOLUÇÕES AQUOSAS DE *MORINGA*
OLEIFERA E SULFATO DE ALUMÍNIO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

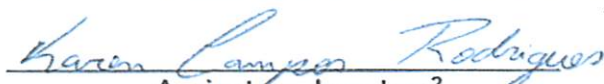
Nome completo do autor: Karen Campos Rodrigues

Título do trabalho: OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA ASSOCIANDO SOLUÇÕES AQUOSAS DE *MORINGA OLEIFERA* E SULFATO DE ALUMÍNIO


3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura da autora²

Ciente e de acordo:


Assinatura do orientador²

Data: 22 / 10 / 2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

KAREN CAMPOS RODRIGUES

OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA
ASSOCIANDO SOLUÇÕES AQUOSAS DE *MORINGA*
OLEIFERA E SULFATO DE ALUMÍNIO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:

Heber Martins de Paula

Coorientador:

Antover Panazzolo Sarmento

CATALÃO – GO

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

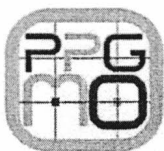
Rodrigues, Karen Campos
OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA ASSOCIANDO
SOLUÇÕES AQUOSAS DE MORINGA OLEIFERA E SULFATO DE
ALUMÍNIO [manuscrito] / Karen Campos Rodrigues. - 2019.
xcvii, 97 f.

Orientador: Prof. Dr. Heber Martins de Paula; co-orientador Dr.
Antover Panazzolo Sarmento.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2019.
Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista
de tabelas.

1. Moringa oleifera. 2. Água cinza. 3. Coagulante natural. 4.
Otimização. 5. Superfícies de Resposta. I. de Paula, Heber Martins,
orient. II. Título.

CDU 628



Defesa Nº _____

Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos 02 dias do mês de setembro do ano de 2019, às 14h:10 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores Dr. Heber Martins de Paula (presidente e orientador), Dr. Celso Vieira Abud e Dra Marina Sangoi de Oliveira Ilha (por videoconferência) para, em sessão pública realizada no Laboratório J3, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: "OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA ASSOCIANDO SOLUÇÕES AQUOSAS DE MORINGA OLEIFERA E SULFATO DE ALUMÍNIO", em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Karen Campos Rodrigues, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (X) **Aprovado** ou () **Reprovado**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 16h:15min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu HEBER MARTINS DE PAULA, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 02 de setembro de 2019.

Heber Martins de Paula

Prof. Dr.: Heber Martins de Paula
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.
(Presidente da Banca)

Celso Vieira Abud

Prof. Dr.: Celso Vieira Abud
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

Marina S de Oliveira Ilha

Prof. Dra.: Marina Sangoi de Oliveira Ilha
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (FEC-
UNICAMP)

Karen Campos Rodrigues

Discente: Karen Campos Rodrigues
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

A todos que trabalham pela universalização dos serviços de água e esgoto.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida. A Jesus Cristo, que é o caminho, a verdade e a vida. Ao Espírito Santo, fonte de todo entendimento.

Aos meus pais, Rivaldo e Oneida, aos meus irmãos, Sávio e Emanuel e ao meu sobrinho, Joaquim, por todo o carinho e confiança.

Ao meu orientador Heber pelo empenho dedicado à orientação desse trabalho. Ao professor Antover por fazer parte deste trabalho com grandes contribuições no delineamento do experimento.

Ao Ruvier, pelo grande auxílio na viabilização do trabalho. À professora Jupyracyara por me ajudar a realizar a análise de coliformes termotolerantes.

Aos professores Celso Vieira Abud e Marina Sangoi de Oliveira Ilha pela leitura e contribuições durante a qualificação deste trabalho.

Aos departamentos de Engenharia Civil e Ciências Biológicas pela liberação para uso dos laboratórios.

Ademais, agradeço a todos que em algum momento me dedicaram alguma oração ou pensamento positivo.

"Mesmo a menor pessoa pode mudar o curso da história"

(Galadriel - A Sociedade do Anel)

RESUMO

RODRIGUES, K. C. *OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA CINZA ASSOCIANDO SOLUÇÕES AQUOSAS DE MORINGA OLEIFERA E SULFATO DE ALUMÍNIO*. 2019. 97 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Dada a crescente demanda por água no mundo, são necessárias abordagens e/ou ações para reduzir o consumo e aumentar a demanda, o reuso de água é uma alternativa viável para aumentar a demanda de água não-potável em residências. O objetivo deste trabalho é otimizar o tratamento da água cinza, proveniente da máquina de lavar roupas, por meio da associação das soluções de sulfato de alumínio e de semente *Moringa oleifera*. Para tal foi realizado um experimento com a água cinza da máquina de lavar de uma residência, dividido em 4 estudos. Foi realizado o Estudo 1 de caracterização dos flocos formados para cada solução estudada, que são a *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio, nitrato de cálcio aquoso e sulfato de alumínio. O Estudo 2 consistiu no experimento do jar-test realizado para cada coagulante separadamente. Posteriormente foi realizado o Estudo 3, com ensaios do jar-test para a associação entre o sulfato de alumínio e a *Moringa oleifera*, com as combinações feitas por meio do Delineamento Composto Central Rotacional como planejamento experimental. Os dados desse ensaio foram avaliados por meio da Metodologia de Superfícies de Resposta. Por fim, no Estudo 4 foi feita a análise da desejabilidade, visando determinar a dosagem ótima para cada coagulante. Os parâmetros avaliados no experimento foram o pH, a turbidez, o volume de lodo gerado e os sólidos dissolvidos totais. Os resultados deste estudo indicam que com o tratamento que utiliza as menores dosagens de coagulante, sendo 20 ml L⁻¹ de *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio e 1 ml L⁻¹ de sulfato de alumínio, é viável o reuso da água cinza, após o tratamento, em descargas de bacias sanitárias. É possível ainda o reuso da água em atividades como lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto com a água, desde que sejam adicionadas as etapas de filtração, para a redução no teor de sólidos dissolvidos totais, e de cloração. Para essas dosagens de coagulantes, a remoção de turbidez foi de 96,22%, o pH variou de 7,2 para 6,8, o teor de sólidos dissolvidos totais foi elevado de 360 mg L⁻¹ para 589 mg L⁻¹, o teor de cloro foi reduzido de 0,54 mg L⁻¹ para 0,10 mg L⁻¹ e o volume de lodo produzido foi de 48,7 cm³. A associação do sulfato de alumínio com a *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio é viável para o tratamento por coagulação da água cinza da máquina de lavar, de forma a reduzir as dosagens de cada coagulante e atender aos critérios das normas.

Palavras-chaves: *Moringa oleifera*, Água cinza, Coagulante natural, Otimização, Superfícies de resposta.

ABSTRACT

RODRIGUES, K. C. *OPTIMIZATION OF THE TREATMENT OF GREY WATER ASSOCIATED WITH AQUEOUS SOLUTIONS OF MORINGA OLEIFERA AND ALUMINIUM SULPHATE*. 2019. 97 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Given the growing demand for water in the world, approaches and/or actions are needed in order to reduce the consume and increase the demand, the water reuse is a viable alternative to increase the non-potable water demand in residences. The objective of this job is optimize the greywater treatment, from the washing machine, through the association of aluminium sulphate and *Moringa oleifera* seeds solutions. For this it was performed an experiment with the greywater from washing machine of a residence, dividing in 4 studies. It was realized the Study 1 of characterization of the flakes formed for each studied solution, which are *Moringa oleifera* extracted in aqueous calcium nitrate, aqueous calcium nitrate and aluminium sulphate. The Study 2 consisted in the jar-test experiment for each coagulant separately. Study 3 was later performed, which jar-test experiments for the association between aluminium sulphate and *Moringa oleifera*, with the combinations made through Central Composite Rotational Design as experimental planning. The data of this test was evaluated by the Response Surface Methodology. Lastly, in the Study 4 was made the desirability analysis, aiming to determine the optimal dosage for each coagulant. The parameters evaluated in the experiment was the pH, turbidity, sludge volume generated and total dissolved solids. The results of this study indicate that with the treatment that use the lower dosages of coagulant, being 20 ml L⁻¹ of *Moringa oleifera* extracted in calcium nitrate and 1 ml L⁻¹ of aluminium sulphate, is viable the greywater reuse, after the treatment, in toilet flush. It's still possible the water reuse in activities like car wash and other uses that require direct contact with the water, as long as added the steps of filtration, to reduce the total dissolved solids, and chlorination. For this coagulants dosages, the turbidity removal was 96,22%, the pH varied of 7,2 to 6,8, the total dissolved solids content was elevated of 360 mg L⁻¹ to 589 mg L⁻¹, the chlorine content was reduced of 0,54 mg L⁻¹ to 0,10 mg L⁻¹ and the sludge volume generated was 48,7 cm³. The association of aluminum sulphate with *Moringa oleifera* extracted in aqueous calcium nitrate it is viable for coagulation treatment of greywater from washing machine, in order to reduce the dosages of each coagulant and attend standards criteria.

Keywords: *Moringa oleifera*, Greywater, Natural coagulant, Optimization, Response surfaces.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caracterização da água residuária residencial.	29
Figura 2.2 – Classificação dos sólidos totais presentes na água.	32
Figura 2.3 – Vertentes identificadas para a busca “Greywater AND coagulation”.	37
Figura 2.4 – Vertentes identificadas para a busca “Moringa oleifera AND wastewater”.	37
Figura 2.5 – Evolução da publicação de artigos selecionados ao longo dos anos para as buscas.	38
Figura 2.6 – Principais países com artigos selecionados.	39
Figura 2.7 – Representação esquemática da dupla camada elétrica.	40
Figura 2.8 – <i>Moringa oleifera</i> (a) e suas vagens e sementes (b).	44
Figura 2.9 – Microscopia eletrônica de varredura do pó da semente de <i>M. oleifera</i> cru.	45
Figura 2.10 – Remoção de turbidez para os coagulantes <i>M. oleifera</i> Lam (MO) e sulfato de alumínio (AS) em diferentes valores de pH.	46
Figura 2.11 – Efeito floculante da <i>M. oleifera</i> na agregação de <i>E. coli</i> (a) amostra de controle e (b) utilizado tratamento com a <i>M. oleifera</i>	46
Figura 2.12 – Diagrama de coagulação utilizando <i>M. oleifera</i> e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de turbidez.	48
Figura 2.13 – Efeitos da dosagem de <i>Moringa oleifera</i> (após extração do óleo) e tempo de sedimentação sob os sólidos suspensos (TSS); gráfico da superfície 3D e de contorno.	51
Figura 2.14 – Exemplo de DCC para duas variáveis, x_1 e x_2	54
Figura 3.1 – Delineamento da pesquisa.	57
Figura 3.2 – Preparo do extrato de moringa (a) sementes antes do processo (b) farinha da semente de moringa (c) mistura com nitrato de cálcio (d) filtragem.	60
Figura 4.1 – Comportamento da formação de flocos em função da adição de SA.	66
Figura 4.2 – Comportamento da formação de flocos em função da adição de MO+NC.	66
Figura 4.3 – Comportamento da formação de flocos em função da adição de NC.	66
Figura 4.4 – Variação da redução de turbidez, em porcentagem, para SA, MO+NC e NC. Os valores negativos indicam que houve um aumento na turbidez testada com a solução NC.	67

Figura 4.5 – Ensaio do jar-test: (a)MO+NC (b)NC (c)SA.	69
Figura 4.6 – Variação do volume de lodo para SA, MO+NC e NC.	70
Figura 4.7 – Variação do pH, para SA, MO+NC e NC.	71
Figura 4.8 – Gráfico de Pareto para análise do pH por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.	75
Figura 4.9 – Gráfico de Pareto para análise da turbidez por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.	76
Figura 4.10 – Gráfico de Pareto para análise do volume de lodo formado, por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.	76
Figura 4.11 – Gráfico de Pareto para análise dos sólidos dissolvidos totais por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.	77
Figura 4.12 – Superfície de resposta para a variação do pH em função das variáveis independentes.	78
Figura 4.13 – Superfície de resposta para a variação da turbidez em função das variáveis independentes.	79
Figura 4.14 – Superfície de resposta para a variação do volume de lodo em função das variáveis independentes.	80
Figura 4.15 – Superfície de resposta para a variação do teor de sólidos dissolvidos totais formado em função das variáveis independentes.	81
Figura 4.16 – Perfil dos valores preditivos e função de desejabilidade para as variáveis de resposta.	82
Figura A.1 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação do pH em função das variáveis independentes.	95
Figura A.2 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da turbidez em função das variáveis independentes.	96
Figura A.3 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação do volume de lodo formado em função das variáveis independentes.	96
Figura A.4 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação do teor de sólidos dissolvidos totais em função das variáveis independentes.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros de qualidade para reuso de água em diferentes países.	28
Tabela 2.2 – Características quantitativas de águas cinzas produzidas em diferentes atividades em residências.	30
Tabela 2.3 – Parâmetros de qualidade de águas cinzas produzidas em diferentes atividades em residências.	31
Tabela 2.4 – Resumo dos resultados obtidos no mapeamento sistemático.	35
Tabela 2.5 – Descrição do critério utilizado para a classificação das vertentes.	36
Tabela 2.6 – Principais países com artigos selecionados.	39
Tabela 2.7 – Tempo e velocidade angular utilizados para coagulação, floculação e sedimentação.	42
Tabela 2.8 – Porcentagem de proteínas, lipídios e açúcares nas sementes de <i>Moringa</i>	44
Tabela 2.9 – Variáveis independentes e dependentes utilizadas na MSR por diversos autores.	52
Tabela 2.10 – Sistema de avaliação de Harrington para interpretar a desejabilidade, <i>d</i>	56
Tabela 3.1 – Dosagens empregadas para os coagulantes no Estudo 2. As unidades de medida de concentração dos coagulantes são ml L ⁻¹	62
Tabela 3.2 – Variáveis de resposta empregadas na modelagem.	62
Tabela 3.3 – Classes e parâmetros de qualidade da água de reuso.	63
Tabela 4.1 – Valores da água cinza sem tratamento.	65
Tabela 4.2 – Médias dos parâmetros pH, turbidez e volume de lodo para os coagulantes SA e MO+NC. Colunas com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.	72
Tabela 4.3 – Variáveis independentes e respectivos níveis.	73
Tabela 4.4 – Matriz de ensaios do delineamento experimental e os resultados obtidos.	74
Tabela 4.5 – Regressões polinomiais de segunda ordem das variáveis dependentes utilizadas na geração das Superfícies de Resposta, gráficos de Pareto e de contorno, com seus respectivos coeficientes de determinação.	74
Tabela 4.6 – Dosagens de cada coagulante para cada combinação analisada no estudo de otimização.	83

Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros de qualidade preditos pela modelagem e obtidos após os ensaios para cada combinação de coagulantes. 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBO — Demanda Bioquímica de Oxigênio

DCCR — Delineamento Composto Central Rotacional

DQO — Demanda Química de Oxigênio

MSR — Metodologia das Superfícies de Resposta

NMP — Número Mais Provável

NTU — Unidades Nefelométricas de Turbidez

SDT — Sólidos Dissolvidos Totais

USEPA — Agência de Proteção Ambiental dos EUA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	24
1.2	Estrutura geral do trabalho	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	Mapeamento sistemático da literatura	34
2.1.1	Tratamento de água por coagulação/floculação	40
2.1.1.1	Mecanismos de coagulação	42
2.1.2	Uso da <i>Moringa oleifera</i> como coagulante	43
2.1.3	Uso da <i>Moringa oleifera</i> associada a sais	47
2.2	Metodologia das superfícies de resposta para a otimização de experimen- tos	48
2.2.1	Delineamento composto central rotacional	53
2.2.2	Desejabilidade	54
3	MÉTODO DA PESQUISA	57
3.1	Delineamento do processo da pesquisa	57
3.1.1	Compreensão do problema e definição do escopo	58
3.1.2	Desenvolvimento da pesquisa	58
3.1.2.1	Coleta das amostras e preparo das soluções	58
3.1.2.2	Estudo 1 - Ensaio de coagulação	61
3.1.2.3	Estudo 2 - Coagulantes separados	61
3.1.2.4	Estudo 3 - Associação dos coagulantes	62
3.1.2.5	Estudo 4 - Otimização das dosagens	62
3.1.3	Análise dos resultados	63
4	RESULTADOS	65
4.1	Estudo 1 - Ensaio de coagulação	65
4.2	Estudo 2 - Coagulantes separados	67
4.3	Estudo 3 - Associação dos coagulantes	73
4.4	Estudo 4 - Otimização das dosagens	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87

REFERÊNCIAS **89**

APÊNDICE A **GRÁFICOS DE CONTORNO PARA O ESTUDO 3** **95**

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Segundo [WWAP \(2016\)](#), no Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, a demanda hídrica aumenta de forma constante a uma taxa de 1% ao ano, fato que leva à necessidade de usar fontes não convencionais de água, como poços e nascentes de baixo rendimento, águas pluviais, escoamento urbano e reciclagem de águas residuárias.

Para aumentar a disponibilidade de água, uma das opções é a realização de grandes obras de infraestrutura, como barragens e aquedutos, entretanto, [Boyjoo, Pareek e Ang \(2013\)](#) salientam que é importante levar em consideração soluções de menor impacto econômico, social e ecológico. Esse pensamento abre espaço para o debate e estudo do reuso de água em residências e indústrias.

Pensando no reuso de água residencial, primeiro é importante distinguir os tipos de água que compõem o efluente. [Vakil et al. \(2014\)](#) categorizam o efluente doméstico em duas partes, água cinza e água negra. É bem estabelecido no mundo acadêmico que a água negra é a água residuária das bacias sanitárias. Por outro lado, existem diversas classificações para a água cinza, a qual será definida neste trabalho como a água residuária produzida nas diferentes fontes da casa, excluindo-se a bacia sanitária, ou seja, é o efluente de chuveiros, lavatórios, máquinas de lavar roupa, pias de cozinha e máquinas de lavar louça. O valor da contribuição da água cinza pode variar de 50 a 80% do efluente total de uma residência, conforme [Al-Jayyousi \(2003\)](#).

Quando se pensa em sistemas de reuso de água, o ponto de partida, além de qual tipo de água reutilizar, é o método de tratamento a ser empregado. Os métodos de tratamento de água são categorizados em físicos, químicos e biológicos e é comum a associação entre eles. Dentre os métodos químicos, [Libânio \(2010\)](#) define a coagulação como um método de desestabilização das partículas coloidais e suspensas realizada pela conjunção de ações físicas e reações químicas, com duração de poucos segundos entre o coagulante, a água e as impurezas presentes.

Existem diversos tipos de coagulantes, os quais podem ser classificados em químicos ou naturais. Dos coagulantes químicos, destacam-se o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, utilizados tanto no tratamento de águas de uso potável como de águas residuárias.

De acordo com Prasad (2009), escritos em sânscrito da Índia reportam que sementes de nirmali (*Strychnos potatorum*) eram utilizadas para clarear águas superficiais turvas há mais de 4000 anos. Libânio (2010) pondera que registros mais confiáveis remontam ao século XVI no Egito quando eram utilizadas amêndoas maceradas como coagulante. Para Ndabigengesere e Narasiah (1998) o uso de coagulantes naturais foi desencorajado na história recente por não haver validação científica, portanto, a falta de conhecimento da sua eficácia e dos seus mecanismos de ação fez com que seu uso fosse reduzido com o advento dos coagulantes químicos.

Um coagulante natural que tem se destacado na academia é a *Moringa oleifera* (*M. oleifera*). De acordo com Mageshkumar e Karthikeyan (2016) a *M. oleifera* é uma planta tropical da família moringaceae, nativa da Índia, a qual possui 14 espécies no total. A *M. oleifera* cresce em regiões áridas, semiáridas e úmidas e tem sido nomeada como a 'árvore milagrosa' devido aos seus inúmeros benefícios. (DEHGHANI; ALIZADEH, 2016). Um dos benefícios dessa planta é a capacidade de purificação de águas, dada o seu uso como coagulante natural.

Villaseñor-Basulto *et al.* (2018) concluem que o tratamento de águas residuárias utilizando farinha da semente de *M. oleifera* é um método alternativo interessante para países em desenvolvimento, especialmente para pequenas estações de tratamento. Algumas das diversas vantagens do seu uso são: alto custo benefício e baixa toxicidade. O uso da moringa em adição a outros coagulantes químicos para melhorar os processos de tratamento aumenta a sua eficácia e reduz a toxicidade final da água tratada.

Diversos autores têm publicado trabalhos a respeito da utilização da moringa para o tratamento de águas residuárias industriais, a citar Dehghani e Alizadeh (2016), Eri, Hadi e Slamet (2018), Mateus *et al.* (2015) e Paula *et al.* (2018). Por outro lado, há uma demanda de trabalhos a respeito da utilização desse coagulante em água cinza.

Dessa forma, o propósito desta dissertação é investigar a viabilidade da utilização da *M. oleifera* como coagulante natural em associação com o coagulante químico sulfato de alumínio no tratamento de águas cinzas provenientes do uso da máquina de lavar roupas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é otimizar o tratamento da água cinza, proveniente da máquina de lavar roupas, por meio da associação das soluções de sulfato de alumínio e de semente da *M. oleifera*.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Caracterizar a formação de flocos para cada solução de coagulante utilizado no estudo;
- Estudar o efeito da utilização isolada dos coagulantes sulfato de alumínio e *M. oleifera* extraída em nitrato de cálcio no tratamento da água cinza;
- Estudar a associação da *M. oleifera* extraída em nitrato de cálcio e do sulfato no processo de coagulação;
- Determinar a dosagem ótima para cada coagulante por meio da função de desejabilidade.

1.2 Estrutura geral do trabalho

O Capítulo 2 traz o referencial teórico elaborado com base no estudo de mapeamento sistemático. A revisão de literatura foi organizada seguindo a ideia do mapeamento sistemático, ou seja, por um lado foram abordadas as características das águas cinzas e o panorama de reuso, e por outro estudou-se o tratamento de águas residuárias por meio da coagulação, com enfoque especial à *M. oleifera*. Assim, objetivou-se identificar a possibilidade de se realizar um experimento unindo os dois temas.

No Capítulo 3 é descrito o método da pesquisa. A primeira etapa do trabalho foi a compreensão do problema, com a realização do mapeamento sistemático da literatura, revisão de literatura e definição da questão da pesquisa. Na etapa de desenvolvimento da pesquisa foram realizados quatro estudos, que são, respectivamente: ensaio de coagulação, estudo com os coagulantes separados, estudo da associação dos coagulantes e estudo de otimização das dosagens. Tais estudos são a base para o experimento associando a *M. oleifera* e o sulfato de alumínio. A última etapa consistiu na análise dos dados e reflexão final.

O Capítulo 4 traz a análise e discussão dos resultados produzidos. A análise é feita para cada um dos quatro estudos separadamente.

Para o Estudo 1 foi feita a análise da observação visual dos flocos, a qual serviu de base para determinar as dosagens de cada jarro no jar-test. O Estudo 2 consistiu na execução do ensaio do jar-test para cada coagulante, os resultados de cada parâmetro foram analisados por meio de gráficos e do teste de Scott-Knott.

Embasado nos resultados dos estudos anteriores, o Estudo 3 utilizou do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para definir a matriz dos ensaios e da Metodologia das Superfícies de Resposta para modelar o tratamento por coagulação associando a *Moringa oleifera* e o sulfato de alumínio. Os dados da modelagem das superfícies de resposta possibilitaram a análise de desejabilidade global no Estudo 4, para este estudo foram

analisados seis diferentes tipos de tratamento, os quais foram comparados com o modelo de regressão linear de cada variável independente.

No Capítulo 5 são feitas as considerações e reflexões a respeito do experimento. Foram elaborados ainda dois apêndices. O Apêndice A apresenta os critérios utilizados estudo de revisão sistemática da literatura e os dados e estatísticas produzidos a partir deste estudo. Por fim, o Apêndice B mostra os gráficos de contorno de cada variável de resposta para o Estudo 3.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

Para a elaboração da revisão deste trabalho foi realizado uma revisão sistemática de literatura sobre o reuso de água cinza e a utilização da *Moringa oleifera* no tratamento de águas residuárias. Esta revisão, também conhecida como *Mapping studying*, está descrita no Apêndice A.

Conforme afirmam [Boyjoo, Pareek e Ang \(2013\)](#) cada país tem seu nível de rigor ao estabelecer diretrizes de reuso de água cinza, os quais, em geral, são: estéticos (DBO, DQO, turbidez), higiênicos (coliformes totais, coliformes fecais) e técnicos (sólidos suspensos). Segundo [Al-Jayyousi \(2003\)](#), em 1992 a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) publicou as Diretrizes para Qualidade da Água que descrevem estágios de tratamento, requerimentos de qualidade da água e ferramentas de monitoramento. Ainda que existam diretrizes nacionais, cada estado pode ter suas próprias diretrizes, para o reuso urbano irrestrito, 32 estados americanos possuem normas e diretrizes próprias.

Além dos Estados Unidos, países como França, Grécia, Itália, Espanha, Chipre, Portugal ([NOUTSOPOULOS et al., 2018](#)), Austrália, Japão ([BOYJOO; PAREEK; ANG, 2013](#)), Canadá, Israel, Reino Unido ([OH et al., 2018](#)) possuem normas e diretrizes de reuso. No Brasil não existem normas que tratem especificamente do reuso de água, entretanto, na NBR 13969 da [ABNT \(1997\)](#) que trata do projeto, construção e operação de tanques sépticos se estabelece 4 (quatro) classes de reuso para esgoto, com alguns parâmetros exigidos. Os padrões de qualidade da água para reuso em alguns países, encontrados na literatura, são especificados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros de qualidade para reuso de água em diferentes países.

Número	País	pH	Turbidez (NTU)	SDT (mg L ⁻¹)	Cloro residual (mg L ⁻¹)	Coliformes fecais (NMP 100 ml ⁻¹)
I	Estados Unidos	6,0 - 9,0	≤ 2	-	≥ 1,0	Não Detectável
II	Austrália	-	-	-	-	-
III	Canadá	-	≤ 2	-	≥ 0,5	-
IV	Israel	-	-	-	-	-
V	Brasil	6,0 - 8,0	≤ 5	≤ 200	0,5 - 1,5	≤ 200
VI	Brasil	-	≤ 5	-	≥ 0,5	≤ 500
VII	Brasil	-	≤ 10	-	-	≤ 500
VIII	Brasil	6,0 - 9,0	≤ 2	≤ 500	-	Não Detectável

I - USEPA (2012)

II, III e IV - Chaillou *et al.* (2011)

V - Classe I de reuso - ABNT (1997)

VI - Classe II de reuso - ABNT (1997)

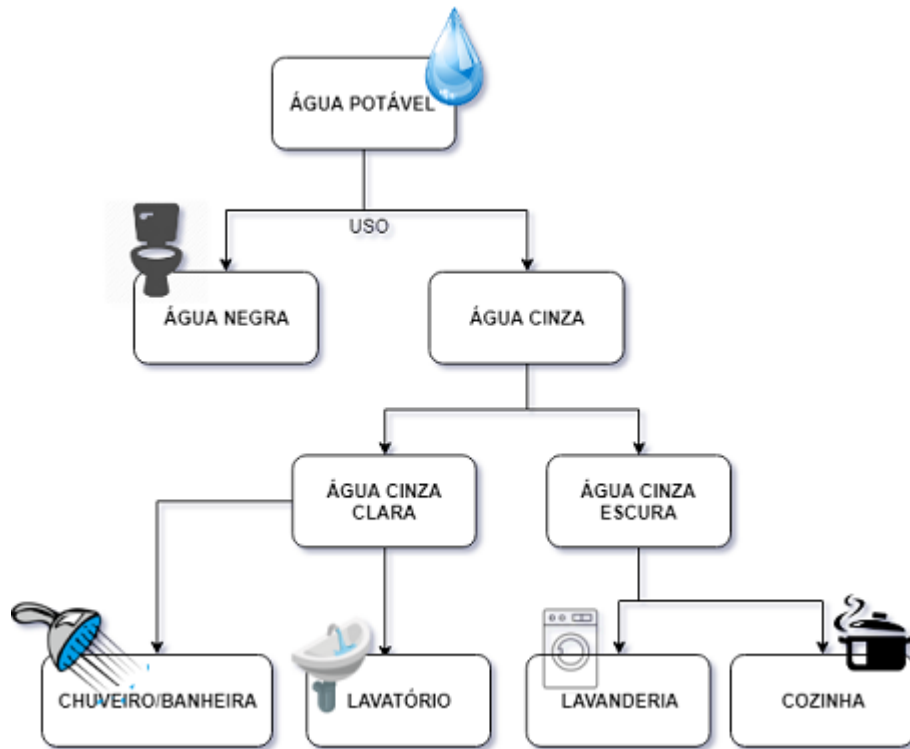
VII - Classe III de reuso - ABNT (1997)

VIII - Classe I de reuso - Sautchuk *et al.* (2005)

Fonte: a autora.

Antes de definir as características da água cinza, é importante conceituar este termo. Água cinza é entendida como toda água residuária, excluindo a contribuição das bacias sanitárias, que é definida como água negra, tese corroborada pelos autores Boyjoo, Pareek e Ang (2013), Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013), Noutsopoulos *et al.* (2018) e Vakil *et al.* (2014) (Figura 2.1). Alguns autores, entretanto, não incluem o efluente da cozinha na definição de água cinza, como Sautchuk *et al.* (2005). Existem ainda subclassificações dentro desse termo, como a classificação feita por Boyjoo, Pareek e Ang (2013), em água cinza com alta e baixa carga poluente, pertencendo ao primeiro grupo as águas residuárias da cozinha e máquina de lavar, e ao segundo grupo toda a água cinza produzida em uma residência, excluídas as do primeiro grupo.

Figura 2.1 – Caracterização da água residuária residencial.



Fonte: a autora.

Segundo diferentes autores a quantidade de água cinza produzida em residências varia entre 72 a 77% do total de água residuária, sendo que nesse mesmo universo de análise, a porcentagem de água cinza produzida no processo de lavagem de roupas varia entre 12 a 27,6% (Tabela 2.2). Conforme afirmam *Vakil et al. (2014)*, diversos fatores como a qualidade no abastecimento de água, atividades desenvolvidas nas residências, qualidade de vida dos moradores, condições climáticas da área, situação econômica, dentre outros, influenciam na quantidade e qualidade da água cinza gerada. O método utilizado em cada estudo para estimar as quantidades produzidas em cada atividade também influencia nos resultados encontrados.

Tabela 2.2 – Características quantitativas de águas cinzas produzidas em diferentes atividades em residências.

	Índia	Israel	Grécia	Dinamarca	Brasil
Origem	Vakil <i>et al.</i> (2014)	Penn, Hadari e Friedler (2012)*	Noutsopoulos <i>et al.</i> (2018)*	Revitt, Eriksson e Donner (2011)*	Fiori (2005)
Banheira/chuveiro (%)	27	28	28	36	41
Lavatório (%)	6	13	8	–	10,9
Cozinha (%)	44	19	22	21	20,6
Máquina de lavar roupas (%)	24	12	14	14	27,6

* A pesquisa também incluiu a quantidade de águas negras produzidas em descargas de bacias sanitárias.

Fonte: a autora.

Cada fonte produtora de água cinza em residências possui aspectos bem peculiares relativos à sua utilização, portanto é natural que as características qualitativas apresentem variação em seus parâmetros, conforme é apresentado na Tabela 2.3. Os valores de pH são mais elevados para a água cinza provenientes da lavagem de roupas (8,3 – 10), valores considerados alcalinos. Para a água cinza advinda de banheiros, tanto de chuveiros quanto lavatórios, os valores encontrados para pH são levemente alcalinos, diferentemente dos valores encontrados nas pias de cozinha, com valores levemente ácidos.

O valor encontrado para o pH se relaciona diretamente com os sólidos dissolvidos na água. Os parâmetros Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) e a relação entre eles (DBO/DQO) são bons indicativos para o tipo de tratamento mais indicado para o esgoto. Segundo Boyjoo, Pareek e Ang (2013), taxas de $DBO/DQO \geq 0,5$ indicam bom potencial para tratamento biológico, uma vez que quanto maior essa relação, maior a carga biológica. A água cinza advinda da cozinha possui taxas de DBO/DQO maiores, devido a alta carga orgânica, pois essa água possui restos de alimento, óleos, gorduras. Por outro lado, a água cinza da máquina de lavar apresenta menores taxas, em função dos produtos químicos utilizados na lavagem de roupas, como detergente, sabão, alvejante, dentre outros.

A turbidez e a presença de sólidos afetam diretamente o fator estético da água cinza. Nota-se, pela Tabela 2.3, que nesse tipo de água residuária é maior a presença dos Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), em especial na água cinza da máquina de lavar. Para os Sólidos Suspensos Totais, Oteng-Pepurah, Acheampong e Vries (2018) observam que seus valores são mais elevados para a água cinza da cozinha e máquina de lavar, devido a lavagem de roupas, sapatos, vegetais, frutas, tubérculos e diversos outros itens que podem conter areia, argila e outros materiais. Para a turbidez, os valores são relativamente baixos, tese corroborada por Al-Jayyousi (2003).

Tabela 2.3 – Parâmetros de qualidade de águas cinzas produzidas em diferentes atividades em residências.

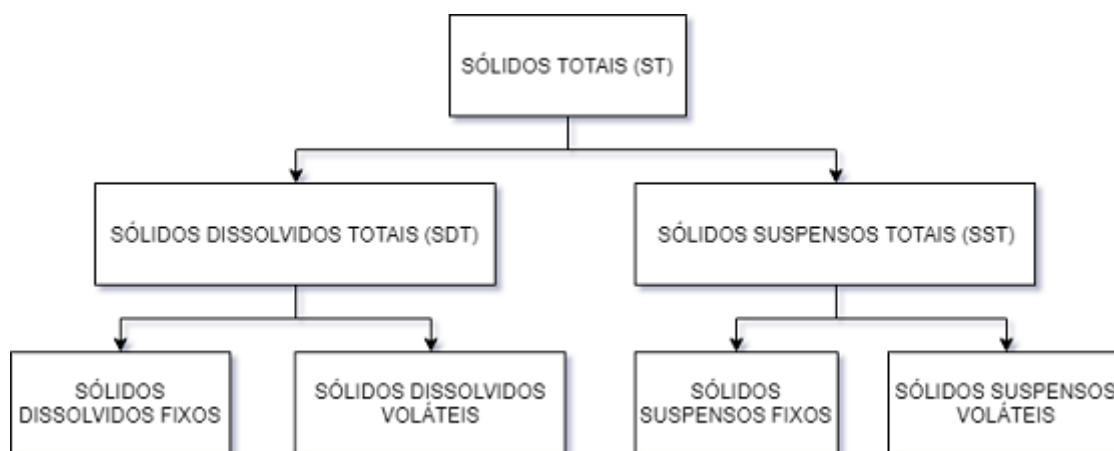
Origem da água cinza	pH	Turbidez (NTU)	SST (mg L ⁻¹)	SDT (mg L ⁻¹)	DBO ₅ (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	Coliformes totais (MPN 100 mL ⁻¹)	Referência
Água cinza misturada	7	75	484	1054	198	499	1,50E + 06	Vakil <i>et al.</i> (2014)
	9,03	-	542	1269	-	1178	-	Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013)
	7,15-8,34	32-145	121-322	308-620	40-240	126-460	5E4 – 9E6	Ghaitidak e Yadav (2015)
	7,85-7,89	125-290	50,4-50,9	-	54-199	158-438	-	Hauwa <i>et al.</i> (2017)
	7,1	155,6	-	-	-	-	33	Fernandes (2016)
Banheira/Chuveiro	7,5	-	148	277	81	461	-	Vakil <i>et al.</i> (2014)
	7,5	-	73,5	-	263	395	-	Noutsopoulos <i>et al.</i> (2018)
	7,3-7,5	84,8-375	89-353	279-565	40,2-424	77-645	2E2 – 6,8E3	Ghaitidak e Yadav (2015)
Lavatório	7,5	-	48	237	43	225	-	Vakil <i>et al.</i> (2014)
	7,07	-	61	578	-	335	-	Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013)
	7,6	-	90,5	-	305	427	-	Noutsopoulos <i>et al.</i> (2018)
	7-7,3	164	153-259	-	155-205	386-587	9,42E + 03	Ghaitidak e Yadav (2015)
Máquina de lavar roupas	9,4	-	1852	1060	269	824	-	Vakil <i>et al.</i> (2014)
	8,3	-	169	-	1363	2072	-	Noutsopoulos <i>et al.</i> (2018)
	9,3-10	14-400	200-987	400-6000	48-1200	375-4155	-	Manouchchri e Kargari (2017)
	8,3-9,3	328-444	188-315	2140-2444	44,3-462	58-1339	2E2 – 4,2E6	Ghaitidak e Yadav (2015)
	9,3-10	50-210	-	-	48-290	-	2,3E3-3,3E5	Boyjoo, Pareek e Ang (2013)
Cozinha	6,2	-	308	245	293	602	-	Vakil <i>et al.</i> (2014)
	6,72	-	299	595	-	775	-	Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013)
	6,9	-	319	-	831	1119	-	Noutsopoulos <i>et al.</i> (2018)
	6,5-7,7	133-211	134-625	312-903	40,8-890	58-1340	2E2 – 5,29E2	Ghaitidak e Yadav (2015)

Fonte: a autora.

As características físicas das águas são: cor, sabor e odor, temperatura, condutividade elétrica, turbidez e conteúdo de sólidos. A temperatura exerce influência marcante na velocidade das reações químicas, nas atividades metabólicas dos organismos e na solubilidade de substâncias (BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2014). Sendo assim, Bazzarella (2005) afirma que a temperatura pode influenciar no crescimento de microorganismos. Os parâmetros cor, sabor e odor se relacionam mais a características estéticas e são importantes, pois podem influenciar a aceitação do usuário.

A turbidez pode ser definida como a medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido (BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2014), é medida em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU) e está relacionada com os sólidos em suspensão. Os sólidos presentes na água se dividem em sólidos suspensos e sólidos dissolvidos que, em conjunto, compõem os sólidos totais (Figura 2.2). Sólidos em suspensão podem ser definidos como as partículas passíveis de retenção por processos de filtração. Sólidos dissolvidos são constituídos por partículas de diâmetro inferior a 10^{-3} μm e que permaneçam em solução mesmo após a filtração (BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2014).

Figura 2.2 – Classificação dos sólidos totais presentes na água.



Fonte: a autora.

As características químicas são representadas pelo pH, dureza e matéria orgânica. Também são características químicas os cloretos, fluoretos, ferro e manganês e micro poluentes, sendo estes últimos compostos basicamente pelos metais pesados.

O pH, abreviação de potencial hidrogeniônico, mede a presença dos íons hidrogênio (H^+), é medido em escala logarítmica e varia de 0 a 14, sendo que valores de 0 a 7 representam condições de acidez, valores de 7 a 14 representam alcalinidade. Valores de pH iguais a 7 são considerados neutros. O controle do pH é importante em sistemas de reuso e pode influenciar na eficiência, por exemplo, de sistemas de tratamento por coagulação.

A alcalinidade, que é a quantidade de íons na água que reagirão para neutralizar os

íons hidrogênio, mede a capacidade da água de neutralizar os ácidos (VON SPERLING, 1996). É constituída por bicarbonato (HCO_3^-), hidróxido (OH^-) e carbonato (CO_3^{2-}). Por outro lado, a acidez mede a capacidade que a água possui de resistir às mudanças de pH causadas pelas bases. A alcalinidade e a acidez estão relacionadas ao pH.

A dureza indica a concentração de cátions multivalentes em solução da água (BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2014). Águas de elevada dureza podem causar incrustações nas tubulações. No que diz respeito aos compostos nitrogenados e fosforados, Bazzarella (2005) afirma que a principal contribuição de fósforo se dá pelos detergentes, enquanto que as concentrações de nitrogênio total na água cinza são mais baixas do que no esgoto convencional, uma vez que a urina é a principal fonte desse nutriente e a mesma não está presente na água cinza. Entretanto, é importante fazer uma ressalva, uma vez que na água cinza proveniente de banheiros pode conter urina.

Os indicadores de matéria orgânica são: a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Enquanto a DBO refere-se exclusivamente à matéria orgânica mineralizada por atividade dos microorganismos, a DQO engloba, também, a estabilização da matéria orgânica ocorrida por processos químicos (BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2014). A DBO está diretamente relacionada com o Oxigênio Dissolvido (OD), pois a primeira indica a quantidade de oxigênio consumido pelos microorganismos para estabilizar a matéria orgânica. Assim, à medida que a DBO aumenta, o oxigênio dissolvido diminui.

Por fim, segundo BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (2014) um dos processos mais significativos para a sobrevivência dos microorganismos no ambiente aquático é a decomposição da matéria orgânica, realizada principalmente por bactérias. Nesse processo, como produto tem-se a matéria inorgânica, nitratos, fosfatos e sulfatos. O lançamento de esgoto sanitário sem tratamento em corpos d'água ocasiona a redução dos níveis de oxigênio dissolvido devido à alta carga de DBO presente nos esgotos, fato que pode comprometer a fauna ali presente. Outro fato decorrente dessa atividade é o aumento na quantidade de nutrientes, a citar o nitrogênio e o fósforo, que pode levar ao crescimento excessivo de plantas aquáticas, denominado eutrofização.

Dentre os microorganismos, existem ainda aqueles que podem oferecer risco à saúde, os chamados patógenos. O grupo de bactérias coliformes é um dos principais indicativos de contaminação da água, dentro desse grupo existem os coliformes totais e os coliformes termotolerantes, sendo estes últimos presentes no intestino de humanos e animais de sangue quente. Quanto maior a população de coliformes em uma amostra de água, maior é a chance de contaminação por organismos patogênicos (BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2014).

2.1 Mapeamento sistemático da literatura

Foi realizado o mapeamento sistemático, seguindo a metodologia utilizada por [Paula e Ilha \(2016\)](#) e [Rodrigues *et al.* \(2017\)](#), para encontrar referências e obter um panorama de publicações e conteúdos abordados a respeito (i) da utilização da *Moringa oleifera* para tratamento de águas residuárias visando reuso e, (ii) tratamento de águas cinzas utilizando os métodos de coagulação e floculação.

O mapeamento sistemático seguiu as seguintes etapas, de maneira análoga a [Oliveira \(2018\)](#): a) definição das questões de pesquisa e das expressões de busca, eleição das bases de dados e seleção dos critérios de inclusão dos artigos a serem estudados; b) leitura dos títulos e resumos dos artigos selecionados e, posteriormente leitura dos artigos e utilização como referência na revisão de literatura do trabalho; c) busca adicional a partir da lista de referências dos documentos selecionados *snowball sampling*; e d) categorização, avaliação e síntese dos dados.

As questões da pesquisa que serviram de base ao estudo de mapeamento sistemático foram:

- Quais as formas de preparo e utilização da *Moringa oleifera* no tratamento de águas residuárias;
- A combinação de coagulantes químico e natural é eficaz?;
- Quais são as características, qualitativas e quantitativas, da água cinza de diferentes fontes como chuveiro, lavatório e máquina de lavar?
- Existem estudos em que a água cinza tratada apresentou qualidade para reuso não potável? Quais os parâmetros avaliados?
- É possível modelar e otimizar as dosagens de coagulantes no tratamento de águas residuárias?

O mapeamento foi realizado no Portal de Periódicos Capes, Scopus, Science Direct e Scielo. Foram utilizadas duas combinações de palavras chaves, sendo: “*Moringa oleifera* AND *wastewater*” e “*Greywater* AND *coagulation*”.

Após a busca, em um momento inicial foram aplicados filtros para artigos de periódicos que passam por processo de revisão por pares e nos idiomas inglês e português. A busca foi exportada em formato “.RIS” para o software JabRef e posteriormente para uma planilha eletrônica no software Microsoft Excel®.

Na planilha, os resultados foram classificados em relação à aderência do título e, posteriormente do resumo, às questões norteadoras do trabalho, também foram contabilizados

os artigos repetidos. Como última etapa, foi realizada a retro análise dos artigos selecionados, denominado *snowball sampling*, a fim de encontrar artigos de referência utilizados pelos autores, e que contribuam para o trabalho, nesta etapa, para a seleção dos artigos, não foram feitas restrições como a de idiomas ou de artigos revisados por pares.

Os resultados do mapeamento são explicitados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resumo dos resultados obtidos no mapeamento sistemático.

Base de dados	<i>Moringa oleifera AND Wastewater</i>		<i>Coagulation AND Greywater</i>	
	Inicial	Título aderente	Inicial	Título aderente
Periódicos CAPES	701	102	170	26
Scopus	159	48	33	12
Science Direct	432	55	122	28
Scielo	7	2	0	0
Total	1299	207	325	66
Número de artigos sem repetições entre as bases de dados		127		41
Números de artigos selecionados após leitura do título e resumo		60		25
Total de artigos selecionados em todas as buscas			85	

Fonte: a autora.

Os artigos selecionados foram classificados quanto a vertente do tema em que abordam, pela leitura do seu resumo. A Tabela 2.5 discrimina as vertentes e traz uma descrição geral do critério utilizado para sua classificação.

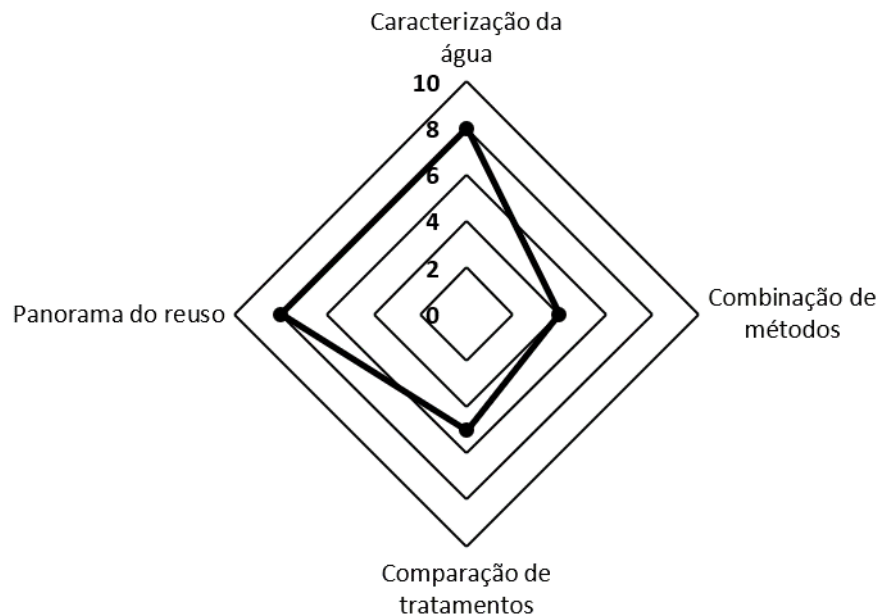
Tabela 2.5 – Descrição do critério utilizado para a classificação das vertentes.

<i>Moringa oleifera AND wastewater</i>	
Vertente	Descrição da vertente
Caracterização da moringa	Estudos feitos a respeito das propriedades da moringa, como da propriedade de coagulação presente nas sementes ou da sua eficiência quando combinada com sais.
Combinação de coagulantes	Tratam a respeito da combinação de diferentes coagulantes para o tratamento de diferentes tipos de água, para consumo e residuária.
Formas de uso da moringa	Sobre as diferentes possibilidades de uso da moringa, como por exemplo no tratamento de água ou na composição da dieta de seres humanos.
Otimização	Estudos de otimização de diversos fatores, por meio da MSR, da utilização da moringa no tratamento de água.
Uso em água residuária	Tratam da utilização da moringa especificamente no tratamento dos mais diversos tipos de água residuária.
<i>Coagulation AND Greywater</i>	
Vertente	Descrição da vertente
Caracterização da água	Trazem a caracterização, qualitativa e/ou quantitativa, da água cinza produzida em diferentes fontes (lavatório, máquina de lavar roupa, chuveiro, cozinha).
Combinação de métodos	Combinação de diferentes métodos de tratamento (coagulação, ultrafiltração, carvão ativado, membranas) para águas cinzas.
Comparação de tratamentos	Comparação de diferentes métodos aplicados separadamente no tratamento de águas cinzas.
Panorama do reuso	Tratam do panorama do reuso em diferentes países, trazem informação a respeito da legislação, dos sistemas de reuso utilizados, do tipo de água cinza reutilizado, dos entraves ao reuso, etc.

Fonte: a autora.

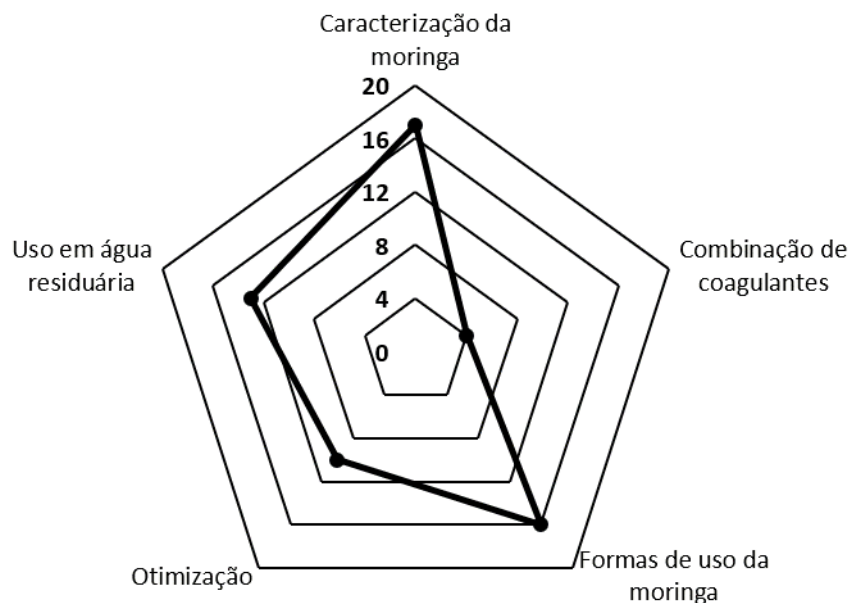
Os resultados da quantidade de artigos encontrados para cada vertente são mostrados nas Figura 2.3 e 2.4.

Figura 2.3 – Vertentes identificadas para a busca “Greywater AND coagulation”.



Fonte: a autora.

Figura 2.4 – Vertentes identificadas para a busca “Moringa oleifera AND wastewater”.



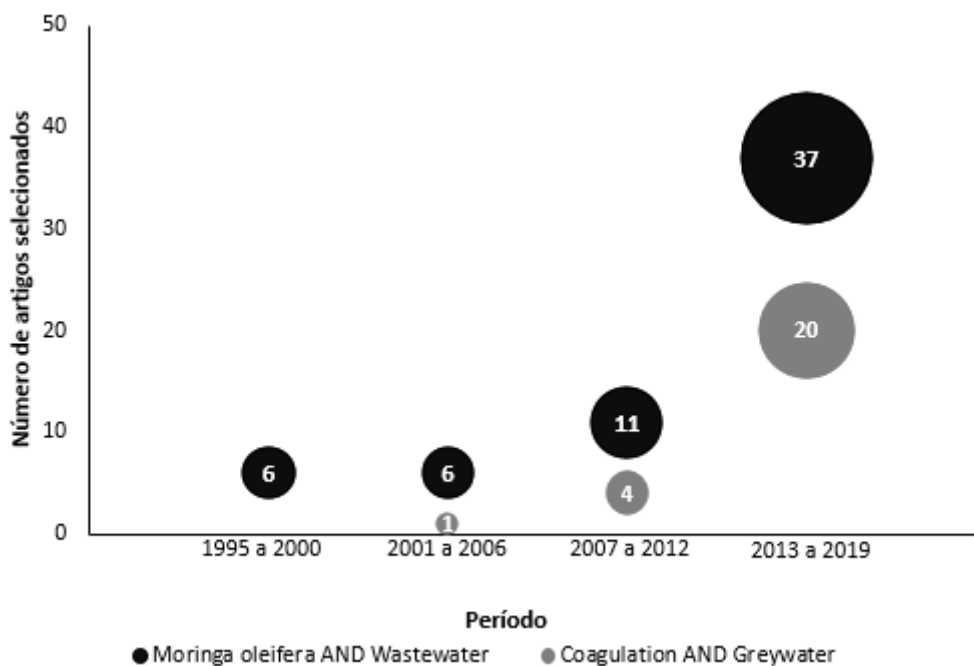
Fonte: a autora.

Para a busca “*Moringa oleifera* AND wastewater”, as vertentes com maior número de artigos selecionados dizem respeito a caracterização da *M. oleifera* e das suas propriedades de coagulação e, das diferentes formas de uso, preparo do extrato, utilização de sais, dentre outros, da *M. oleifera* em estudos do seu uso para tratamento de águas e águas residuárias. A busca englobando as palavras “Greywater AND coagulation” traz a maioria dos artigos em

três vertentes específicas: panorama de reuso, caracterização da água cinza e comparação de diferentes métodos de tratamento.

No tocante a evolução da publicação de artigos ao longo dos anos, nota-se na Figura 2.5 para a busca “*Moringa oleifera* AND wastewater” o aumento do número de publicações se deu a partir do período 2001 a 2010, com ápice no período de 2013 a 2019. Os artigos selecionados da busca “*Greywater* AND *coagulation*” apresentaram resultados expressivos a partir do período de 2011 a 2018.

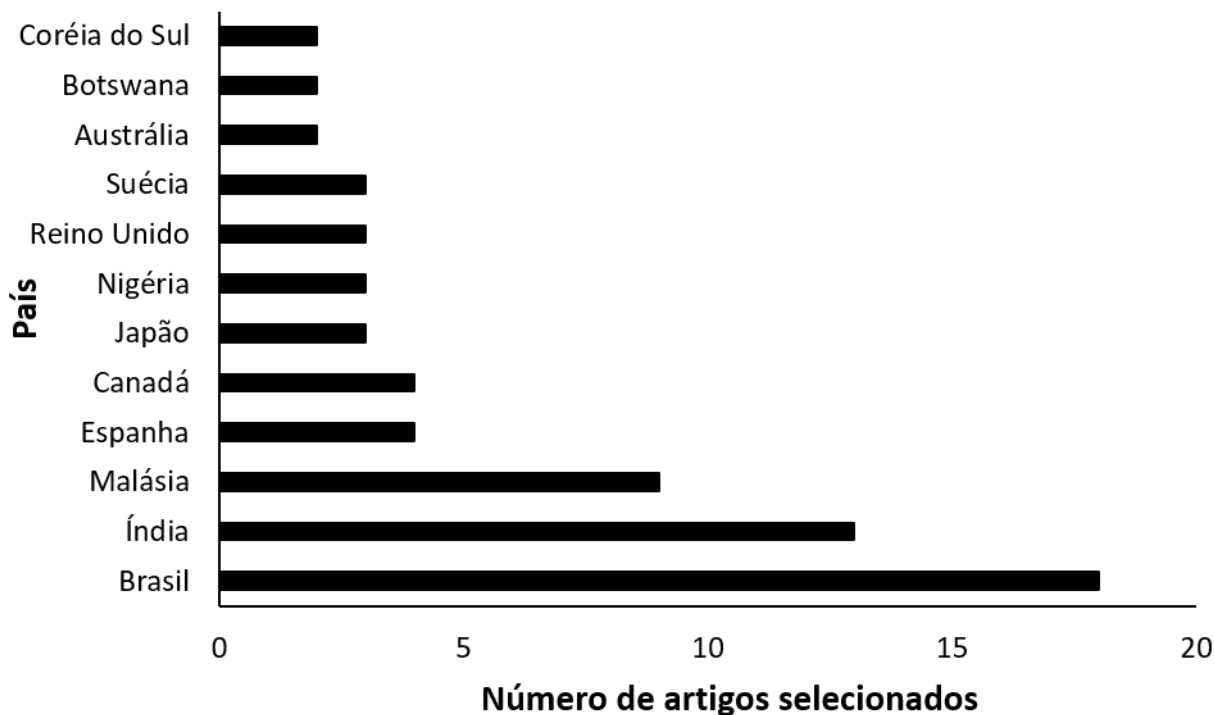
Figura 2.5 – Evolução da publicação de artigos selecionados ao longo dos anos para as buscas.



Fonte: a autora.

Analisando os resultados sob o âmbito de países onde os artigos selecionados foram produzidos, nota-se que o país com maior número de artigos selecionados é o Brasil, fato que se deve ao grande número de pesquisas na área e a seleção de idiomas também incluir artigos em português. Outro fator interessante é que dos 13 países listados na Figura 2.6, seis pertencem à Ásia, continente de origem da *M. oleifera*. A definição do país de cada artigo foi feita com base no país do primeiro autor, definido nas informações dos autores.

Figura 2.6 – Principais países com artigos selecionados.



Fonte: a autora.

No tocante aos periódicos com maior número de artigos selecionados, resumidos na Tabela 2.6, os periódicos *Water Research*, da Associação Internacional da Água, e *Journal of Cleaner Production* se destacam, com 10 e 5 artigos selecionados, respectivamente. Tais dados evidenciam a importância de se realizar o mapeamento sistemático, uma vez que além de fornecer referências para o estudo, permitem a definição do panorama da pesquisa no tema desejado.

Tabela 2.6 – Principais países com artigos selecionados.

Periódico	Número de artigos selecionados
Chemical Engineering Journal	3
Desalination	3
Desalination and Water Treatment	3
Journal of Cleaner Production	5
Journal of Environmental Chemical Engineering	4
Journal of Hazardous Materials	3
Journal of Water Process Engineering	4
Revista Engenharia na Agricultura	2
Water Research	10

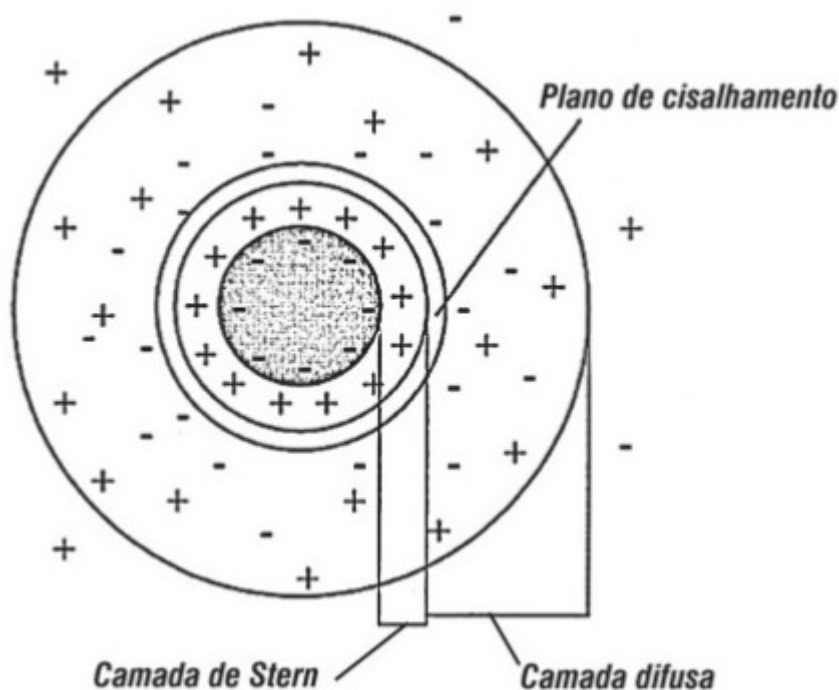
Fonte: a autora.

2.1.1 Tratamento de água por coagulação/floculação

Conforme [Mageshkumar e Karthikeyan \(2016\)](#) a coagulação é um processo desenvolvido para a remoção das partículas coloidais e impurezas suspensas das águas residuárias, nesse processo as partículas coloidais estáveis são desestabilizadas em suspensão para que possam se aglomerar em partículas sedimentáveis. O objetivo principal da coagulação, segundo [Libânio \(2010\)](#) consiste em elevar significativamente a velocidade de sedimentação do aglomerado de partículas a ser formado pela adição de coagulante.

[Libânio \(2010\)](#) explica que quando as partículas coloidais são dispersas na água, íons de carga oposta (K^+ , Na^+ , Ca^{++}) tendem a se aproximar de sua superfície, formando uma camada de íons positivos e negativos, denominada camada de Stern, decorrente de forças de repulsão eletrostática e de atração de van der Waals. Uma representação da dupla camada elétrica é exibida na Figura 2.7 onde é possível observar as partículas coloidais com cargas negativas no centro, cercadas pelos íons de carga oposta, formando a camada de Stern. Devido a movimentação da partícula, entre a camada de Stern e a camada difusa ocorre a existência do plano de cisalhamento. Por fim, na superfície da partícula fica a camada difusa, em que ocorre a movimentação dos íons e co-íons. Devido à natureza da camada difusa, ela pode sofrer compressão e ter sua espessura reduzida.

Figura 2.7 – Representação esquemática da dupla camada elétrica.



Fonte: [Pergoraro \(2016\)](#).

[Prasad \(2009\)](#) explica que os coagulantes convencionais são compostos de um ácido forte, como o ácido clorídrico (HCl) ou sulfúrico (H_2SO_4), e uma base fraca, como o hidró-

xido de alumínio ($\text{Al}_2(\text{OH})_3$) ou de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), o que significa a mistura de um cátion, da base, e um ânion, do ácido.

A floculação, de acordo com Libânio (2010) consiste em uma agitação relativamente lenta, ao contrário da etapa de coagulação, e objetiva proporcionar encontros entre as partículas menores para formar agregados maiores ou flocos. Como consequência, o número de partículas suspensas e coloidais diminui.

Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013) observaram que a presença de água cinza da máquina de lavar na água cinza total resultou em uma menor eficiência do processo de coagulação, provavelmente devido ao menor tamanho das partículas e maior índice de sólidos totais existentes. Os autores testaram o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) para remoção da DQO e do SST, chegando a índices de remoção de 38% e 61%, respectivamente, com dosagens de 500 e 800 mg L^{-1} . Ghaitidak e Yadav (2015), com a dosagem ótima de 204 mg L^{-1} obtiveram índices de remoção de turbidez de 92%, utilizando o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) para águas cinzas oriundas do banheiro.

Pidou *et al.* (2008) comparou os processos de tratamento utilizando resina de troca iônica, coagulação com sulfato férrico (FeSO_4) e sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) e a combinação dos dois métodos para águas cinzas do chuveiro. Os autores concluíram que o índice de remoção de turbidez, com o uso de coagulantes foi de 88 a 91%, enquanto que a resina conseguiu valores de 83%, a combinação dos dois chegou a valores de 94%. Para a DQO e DBO, os valores obtidos foram semelhantes, em torno de 60% para o primeiro e 80% para o segundo.

A combinação da coagulação com outros processos pode melhorar a performance do tratamento de água potável e residuária, nesse sentido é possível a sua utilização como pré e pós tratamento. Jiang (2015) cita algumas possibilidades de combinação de tratamentos, como coagulação-ultrafiltração, Fenton-coagulação e coagulação-processo de separação por membranas. Noutsopoulos *et al.* (2018) realizaram combinações do tratamento, para águas cinzas de diferentes tipos de mistura, por coagulação com sedimentação, filtro de areia e filtro de carvão ativado granular. Diaz *et al.* (2012) estudaram a combinação da coagulação com a ultrafiltração e a remoção de DQO obtida pelos autores variou na faixa de 81 a 95%, o coagulante utilizado foi o policloreto de alumínio (10% Al_2O_3 , 9,2% Cl^- e 2,7% SO_4^{2-}).

Um fator importante no processo de coagulação/floculação é o tempo de sedimentação utilizado após as etapas de coagulação e floculação, para que os flocos se assentem por gravidade. A esse respeito, Paula e Ilha (2016), ao estudar os efeitos da *M. oleifera* e coagulantes químicos sulfato de alumínio e cloreto férrico observaram que para diferentes dosagens do sulfato de alumínio, índices de remoção de turbidez acima de 90% foram obtidos com apenas 15 minutos de sedimentação. Para a *M. oleifera*, é necessário um tempo de sedimentação mínimo de 60 minutos para obter os mesmos índices. Na Tabela 2.7 são reunidos os

tempos e rotações utilizados por diferentes autores nas etapas de coagulação, floculação e sedimentação.

Tabela 2.7 – Tempo e velocidade angular utilizados para coagulação, floculação e sedimentação.

Referência	Coagulante	Tempo de coagulação/floculação	Velocidade angular para coagulação/floculação	Tempo de sedimentação
Dehghani e Alizadeh (2016))	$Al_2(SO_4)_3$	Coagulação – 1 min	Coagulação – 120 rpm	30 min
	<i>M. oleifera</i>	Floculação – 1 min	Floculação – 40 rpm	
Friedler, Katz e Dotsoretz (2008)	$FeCl_3$	Coagulação – 5 min	Coagulação – 100 rpm	50 min
		Floculação – 30 min	Floculação – 25 rpm	
Ghaitidak e Yadav (2015)	Limão ($Ca(OH)_2$)	Coagulação – 1,5 min	Coagulação – 120 rpm	45 min
	$Al_2(SO_4)_3$	Floculação – 15 min	Floculação – 30 rpm	
Hauwa <i>et al.</i> (2017)	<i>Strychnos potatorum</i>	Coagulação – 5 min	Coagulação – 150 rpm	30 - 120 min
	<i>M. oleifera</i>	Floculação – 15 min	Floculação – 50 rpm	
Khayet, Zahrim e Hilal (2011)	$Al_2(SO_4)_3$	Coagulação – 3 min	Coagulação – 250 rpm	120 min
		Floculação – 20 min	Floculação – 30 rpm	
Ndabigengesere e Narasiah (1998)	<i>M. oleifera</i>	Coagulação – 2 min	Coagulação – 100 rpm	30 min
		Floculação – 20 min	Floculação – 40 rpm	
Noutsopoulos <i>et al.</i> (2018)	$Al_2(SO_4)_3$	Coagulação – 1 min	Coagulação – 200 rpm	50 min
		Floculação – 7,5 min/7,5 min/5 min	Floculação – 70 rpm/40 rpm/25 rpm	
Paula <i>et al.</i> (2018)	$Al_2(SO_4)_3$	Coagulação – 2 min	Coagulação – 100 rpm	60 min
	$FeCl_3$	Floculação – 20 min	Floculação – 40 rpm	
	<i>M. oleifera</i>			

2.1.1.1 Mecanismos de coagulação

Existem quatro mecanismos de coagulação responsáveis pela desestabilização das partículas coloidais, a citar: compressão da dupla camada, adsorção e neutralização de cargas, varredura e formação de pontes químicas.

Na compressão da dupla camada, são adicionados eletrólitos a solução. 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). Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) explicam que nesse mecanismo não é possível causar a reversão da carga dos colóides, independentemente da quantidade de eletrólitos adicionada.

A adsorção e neutralização de cargas é um mecanismo dependente do tipo de água ao qual o coagulante é adicionado. Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) ressaltam que nesse mecanismo existe a possibilidade de reestabilização da solução coloidal por reversão da carga superficial, quando ocorrer superdosagem do coagulante. Os autores afirmam ainda que as espécies adsorvíveis são capazes de desestabilizar os colóides em dosagens muito inferiores às necessárias para compressão da camada difusa.

A medida que se aumenta a dosagem do coagulante, Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) afirmam que começa a predominar o mecanismo de varredura, com formação de precipitados e com sedimentação mais rápida. Segundo Libânio (2010) tal formação é função da dosagem do coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água.

Por fim, o último mecanismo é o da formação de pontes químicas, o qual, conforme Libânio (2010), ocorre quando se tem o emprego de polímeros, que podem ser naturais ou sintéticos, como auxiliares de floculação visando reduzir a dosagem do coagulante. Esses polímeros, entretanto, podem apresentar alto custo.

2.1.2 Uso da *Moringa oleifera* como coagulante

A família Moringaceae possui 14 espécies, sendo que a espécie *Moringa oleifera* (Figura 2.8) tem ganhado considerável importância como coagulante, remédio e comida em quase todas as regiões tropicais e subtropicais.

A propriedade coagulante da *M. oleifera* está presente nas sementes, com ou sem casca, segundo Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995). Mageshkumar e Karthikeyan (2016) realizaram a caracterização do pó da semente da *M. oleifera*, a presença de elementos básicos como carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) em grandes proporções confirmam a sua natureza orgânica, que é responsável pela biodegradabilidade do coagulante natural. A composição desses elementos é a seguinte: Carbono - 61,38%, Oxigênio - 34,91%, Nitrogênio - 3,46% e Enxofre - 0,25%. A biodegradabilidade é um importante característica para um coagulante, pois implica que o lodo produzido, após o tratamento, também será biodegradável. A composição percentual dos macronutrientes, ou seja, proteínas, lipídios e carboidratos sob a forma de açúcares, da semente da *M. oleifera* é especificada na Tabela 2.8.

Figura 2.8 – *Moringa oleifera* (a) e suas vagens e sementes (b).

Fonte: a autora.

Tabela 2.8 – Porcentagem de proteínas, lipídios e açúcares nas sementes de *Moringa*.

Forma de preparo das sementes	Proteínas (%)	Lipídios (%)	Açúcares (%)
Sem casca			
- Em pó	36,7	34,6	5
- Solução	0,9	0,8	-
- Sólidos residuais	29,3	50,3	1,3
Com casca			
- Em pó	27,1	21,1	5,5
- Solução	0,3	0,4	-
- Sólidos residuais	26,4	27,3	-

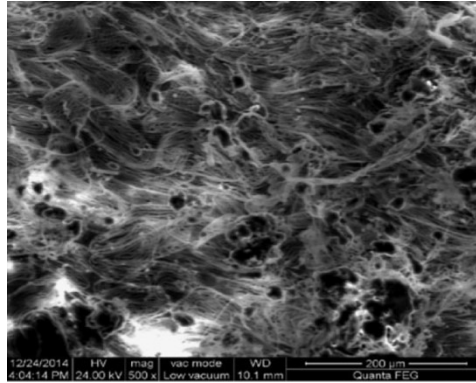
Fonte: Adaptado de [Ndabigengesere, Narasiah e Talbot \(1995\)](#).

Experimentos realizados por [Ndabigengesere, Narasiah e Talbot \(1995\)](#) comprovaram que as proteínas ativas da *M. oleifera* possuem cargas positivas, com natureza altamente catiônica. O mecanismo de coagulação das sementes da *M. oleifera* consiste na adsorção e neutralização das cargas coloidais positivas que atraem as impurezas negativamente carregadas na água ([DEHGHANI; ALIZADEH, 2016](#)).

A dosagem excessiva de coagulantes quando da adsorção pode levar à reestabilização das partículas coloidais. Esse fato foi observado por [Ndabigengesere, Narasiah e Talbot \(1995\)](#) para o extrato da moringa preparado com sementes sem casca, situação em que para dosagens além da ótima foi observado o aumento no valor da turbidez residual. É mostrado

na Figura 2.9 uma imagem de microscopia eletrônica de varredura do pó da semente da *M. oleifera*, onde é possível observar a natureza da fibra das sementes.

Figura 2.9 – Microscopia eletrônica de varredura do pó da semente de *M. oleifera* cru.

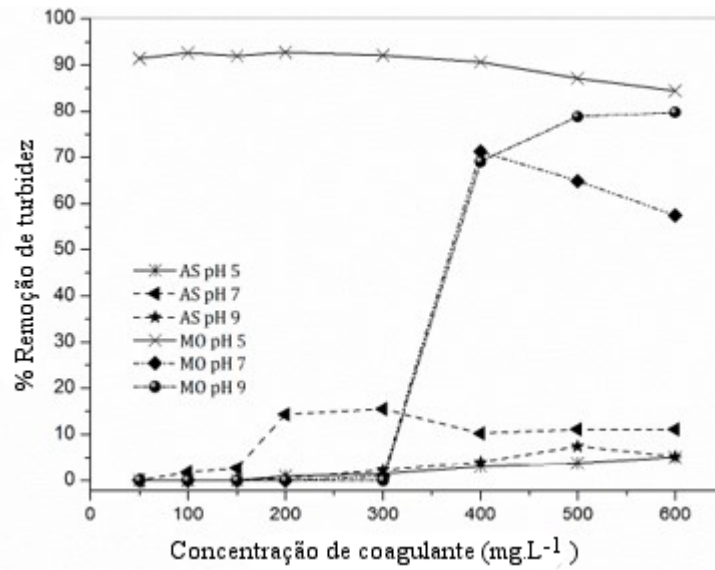


Fonte: Adaptado de [Mageshkumar e Karthikeyan \(2016\)](#).

Um estudo realizado por [Ndabigengesere e Narasiah \(1998\)](#) indicou que o uso da *Moringa oleifera* como coagulante não altera significativamente o pH da água. Os autores observam ainda que as sementes secas podem ser usadas com casca ou sem casca, entretanto, as sementes sem casca são mais eficazes.

A respeito da relação entre o pH e o percentual de remoção de turbidez, [Mateus et al. \(2015\)](#) realizaram estudos a respeito da eficiência do tratamento por coagulação de águas residuárias de laticínios em diferentes faixas de pH, conforme exibido na Figura 2.10, para o sulfato de alumínio e *M. oleifera*. O maior índice de remoção atingido para a *M. oleifera* ocorreu com pH 5, valores mais eficazes do que os encontrados com o sulfato de alumínio, cujo melhores índices foram obtidos com pH 7.

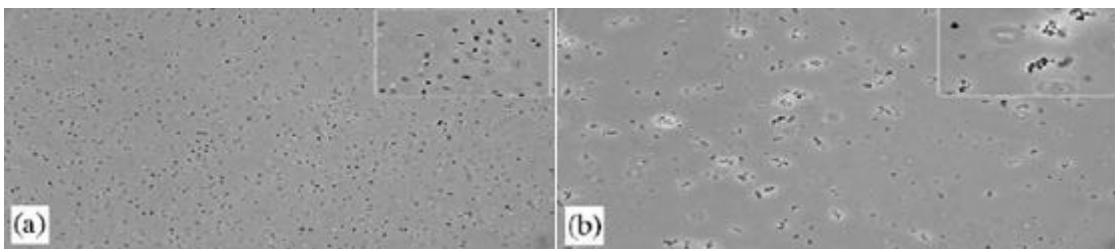
Figura 2.10 – Remoção de turbidez para os coagulantes *M. oleifera* Lam (MO) e sulfato de alumínio (AS) em diferentes valores de pH.



Fonte: Mateus *et al.* (2015).

Um estudo realizado por Ghebremichael *et al.* (2005), a respeito da atividade antimicrobiana da proteína da *M. oleifera* para investigar a agregação de células e inibição de crescimento de patógenos, mostrou que foi possível chegar a valores de 1,1–4 log de redução para *E. coli*, *B. thuringiensis* e *P. aeruginosa*. (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Efeito floculante da *M. oleifera* na agregação de *E. coli* (a) amostra de controle e (b) utilizado tratamento com a *M. oleifera*.



Fonte: Adaptado de Ghebremichael *et al.* (2005).

Ao estudar o efeito da *M. oleifera* em águas de turbidez média, elevada e muito elevada, Katayon *et al.* (2006) descobriram que a eficiência na remoção de turbidez é maior para águas de turbidez muito elevada, atingindo o valor de 94%. Os autores conseguiram chegar a valores finais de turbidez na faixa de 20 NTU, mesmo que o valor inicial variasse de 87,8 a 390 NTU. Dehghani e Alizadeh (2016) conseguiram índices de remoção de turbidez, DQO e SST em 63,7%, 38,6% e 62,05%, respectivamente, para águas residuárias de uma refinaria de diesel no Irã, utilizando a *M. oleifera* como coagulante.

2.1.3 Uso da *Moringa oleifera* associada a sais

Segundo Prasad (2009) a atividade coagulante do extrato de moringa aumenta com o aumento da força iônica da solução extratora o que, conseqüentemente, causa o aumento da solubilidade dos componentes ativos. Okuda et al (1999) concluíram que a melhora na utilização do sal se dá pelo mecanismo “*salting-in*” nas proteínas, onde o sal aumenta a dissociação proteína-proteína, aumentando a solubilidade da proteína à medida que a força iônica do sal aumenta. O componente ativo do extrato preparado utilizando sais é, principalmente, proteína.

Okuda *et al.* (1999) comparou a eficiência de diferentes sais (NaCl, KNO₃, KCl e NaNO₃) e água destilada para preparar o extrato da moringa, avaliando a remoção de turbidez de uma água preparada sinteticamente. Partindo de uma turbidez inicial de 50 NTU, os autores conseguiram chegar a um índice de remoção de turbidez de 78% com a dosagem de 32 ml L⁻¹, para o extrato preparado em água destilada, enquanto utilizando o extrato preparado com o NaCl, a uma dosagem de 4 ml L⁻¹ o índice foi de 95%, ou seja, 7,4 vezes mais eficiente do que o preparado apenas com água destilada.

Mageshkumar e Karthikeyan (2016) concluíram que o preparo do extrato de moringa utilizando cloreto de sódio (NaCl) é melhor do que o preparado com cloreto de potássio (KCl), quando analisado o tratamento de efluente de uma indústria de curtume e que a moringa não afeta o pH e condutividade dessa água residuária.

De acordo com Jiang (2015), os coagulantes utilizados para tratamento de água e águas residuárias são predominantemente sais inorgânicos de ferro e alumínio, sendo o sulfato de alumínio e cloreto férrico utilizados há mais de 100 anos. A respeito do sulfato de alumínio, Valverde *et al.* (2018) destaca que é o coagulante químico mais utilizado no Brasil para tratamento de águas destinadas ao abastecimento público, apresentando faixa de atuação em águas com pH variando entre 5,5 a 8,0.

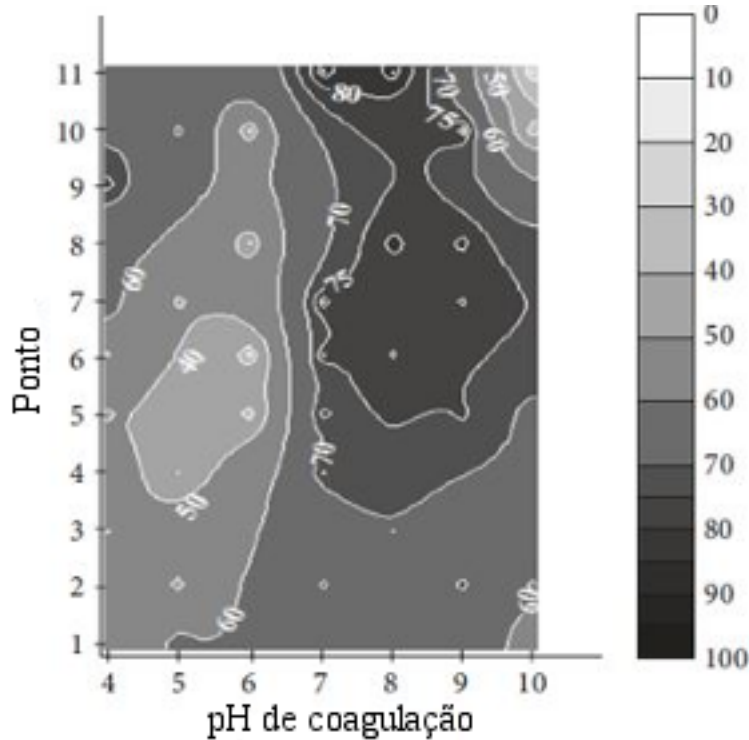
Segundo Eri, Hadi e Slamet (2018), o sulfato de alumínio realiza uma rápida hidrólise no interior da solução aquosa para formar espécies catiônicas e, posteriormente, será adsorvido com partículas coloidais carregadas negativamente, formando microflocos.

Khayet, Zahrim e Hilal (2011) realizaram a modelagem do tratamento via coagulação das águas residuárias da indústria de peças de couro, variando os seguintes parâmetros: dosagem de sulfato de alumínio, pH e temperatura. Para a dosagem ótima encontrada, de 0,802 g L⁻¹ e pH de 5,61, o índice de remoção de cor foi de 97,78%.

Diversos autores têm estudado a eficiência da combinação de coagulantes para o tratamento de água. Ao estudar os efeitos da combinação da *M. oleifera* e sulfato de alumínio, Valverde *et al.* (2018) concluiu que para faixas de pH variando entre 7 e 9, a associação desses coagulantes, com dosagens acima de 17,5 mg L⁻¹ de sulfato de alumínio e 15 mg L⁻¹ de extrato de moringa apresentou características sinérgicas, com remoção de turbidez de 75%,

como é mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Diagrama de coagulação utilizando *M. oleifera* e sulfato de alumínio contendo curvas de remoção de turbidez.



Fonte: Adaptado de Valverde *et al.* (2018).

Paula *et al.* (2018) estudaram a otimização da dosagem dos seguintes coagulantes combinados: *M. oleifera*, cloreto férrico e sulfato de alumínio. Visando o tratamento das águas residuárias de usinas de concreto, os autores observaram que a dosagem ótima para os coagulantes é de $0,47 \text{ g L}^{-1}$ de *M. oleifera*, $0,36 \text{ g L}^{-1}$ de sulfato de alumínio e $3,6 \text{ ml L}^{-1}$ ($0,18 \text{ g L}^{-1}$) de cloreto férrico, com índice de remoção de turbidez de 99,88%.

2.2 Metodologia das superfícies de resposta para a otimização de experimentos

A Metodologia das Superfícies de Resposta (MSR) foi formalmente introduzida por G. E. P. Box, na década de 1950, sendo o artigo Box (1954) um de seus primeiros trabalhos a respeito, entretanto, as formulações iniciais dessa metodologia datam da década de 1930. Conforme Perázio (2010), em planejamentos experimentais em que o principal objetivo é caracterizar a relação entre uma ou mais variáveis resposta e um conjunto de fatores de interesse, procura-se construir um modelo que descreva a variável resposta em função dos intervalos estudados desses fatores. Sendo assim, a MSR permite aproximar um modelo e

uma relação inicial entre os fatores e as respostas do processo. [Box e Youle \(1955\)](#) definem a superfície de resposta como uma representação gráfica da Equação 2.1

$$\eta = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (2.1)$$

Em que:

η = variável de resposta;

x_1, x_2, \dots, x_k = variáveis quantitativas, ou fatores;

ϕ = conjunto das variáveis quantitativas.

A Equação 2.1 representa a relação entre alguma resposta, cujo nível é detonado por η e um número de variáveis quantitativas (ou fatores), cujos níveis são denotados por x_1, x_2, \dots, x_k . Não se busca apenas uma resposta com um resultado ótimo para apenas um fator, olhando apenas para um resultado, mas um conjunto de respostas que indique bons resultados para os diversos fatores, uma vez que deve ser considerado a dependência entre os diversos fatores. Uma vez que os fatores se relacionam entre si, ao realizar os experimentos deve ser investigada, conjuntamente, a influência dos fatores na resposta, e não investigar apenas a variação de um fator separadamente.

Para investigar a superfície de resposta em torno das condições de determinado experimento, na falta do conhecimento de modelos especializados, parte-se de um polinômio generalizado, correspondente à representação da função por uma série de Taylor. Por exemplo, o seguinte polinômio (Equação 2.2) representa uma função de um modelo com duas variáveis independentes, sendo os coeficientes β parâmetros do modelo e Y a resposta.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{12} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.2)$$

Generalizando, o polinômio pode ser escrito como mostra a Equação 2.3

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1} \beta_i x_i + \sum_{i=1} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.3)$$

Em que:

Y = variável resposta, ou dependente;

β = parâmetros do modelo;

x = variáveis independentes.

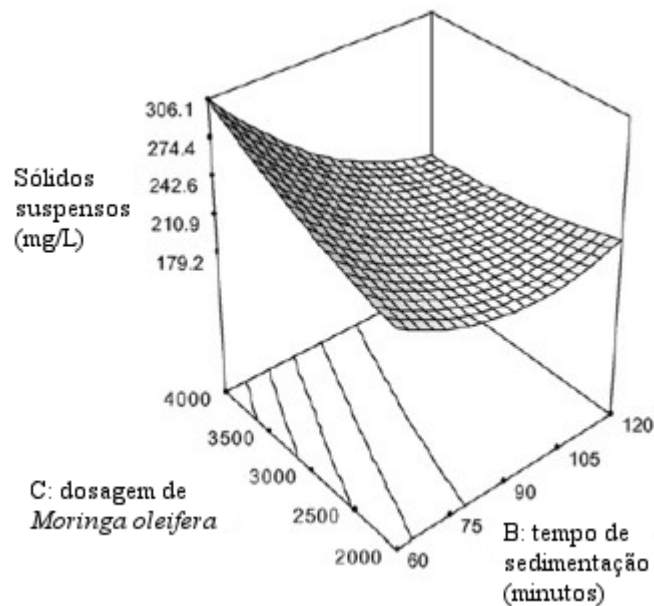
Segundo [Barros Neto, Scarminio e Bruns \(2001\)](#) a MSR possui duas etapas distintas: modelagem e deslocamento, as quais são repetidas até que o objetivo de atingir uma região ótima da superfície investigada seja alcançado. A modelagem é feita ajustando modelos

simples a respostas obtidas com planejamentos experimentais, enquanto o deslocamento é dado ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo. Esse método de ajuste do modelo às respostas obtidas é explicitado por [Box \(1954\)](#) sendo que o método sequencial é descrito da seguinte forma:

1. O início é dado com o ajuste de uma equação do primeiro grau, representando um plano. Se esse plano parece fornecer um ajuste razoável e estiver inclinado em uma direção particular, então pode ser feito progresso seguindo a direção de maior inclinação, ou subida máxima, o que pode levar a um ponto onde nenhum ganho adicional é obtido. Pode ser definido um segundo plano e o procedimento é repetido. Uma vez que se faz apenas um simples ajuste de equação, os ganhos obtidos diante de tal procedimento seriam modestos.
2. Progressos adicionais com esse método não seriam possíveis, porém na vizinhança do melhor ponto atingido, um padrão adequado de experimentos seria realizado e os polinômios de segundo grau podem ser ajustados com máxima eficiência.
3. A análise do polinômio de segundo grau ajustado indicam certas características da superfície que exigem um maior grau de estudo como, por exemplo, a existência de máximos locais.
4. Outros pontos de confirmação nas posições indicadas pela primeira superfície ajustada seriam adicionados e a superfície reajustada, incluindo a informação desses pontos adicionais.
5. Se o polinômio de segundo grau não fornecer um ajuste adequado e, por consequência, o modelo também, então medidas seriam tomadas para realizar o ajuste de uma equação de terceiro grau.

Para [Perázio \(2010\)](#) as vantagens da MSR residem no fato de que trata-se de uma metodologia robusta, com resultados resistentes aos impactos das condições não ideais, como erros aleatórios e pontos influentes. Outra vantagem seria a simplicidade analítica obtida devido ao fato de se trabalhar com polinômios, evitando-se, por exemplo, erros de continuidade. É apresentado na [Figura 2.13](#) um exemplo de gráfico de superfície de resposta dos Sólidos Suspensos Totais (SST), em ml L^{-1} , com as seguintes variáveis independentes: a dosagem de *Moringa oleifera* no tratamento por coagulação e o tempo de sedimentação empregado.

Figura 2.13 – Efeitos da dosagem de *Moringa oleifera* (após extração do óleo) e tempo de sedimentação sob os sólidos suspensos (TSS); gráfico da superfície 3D e de contorno.



Fonte: Bhatia, Othman e Ahmad (2007).

Então, na MSR utilizam-se de variáveis independentes e as respostas, ou variáveis dependentes, a escolha de quais variáveis utilizar é particular e relacionada ao que se pretende com o experimento. Diversos experimentos têm sido feitos usando essa metodologia, principalmente na área industrial e no desenvolvimento de projetos e processos. Nas pesquisas relacionadas ao tratamento de água e esgoto, alguns artigos utilizando a MSR também tem sido publicados artigos visando a otimização da dosagem de coagulantes, a citar Bhatia, Othman e Ahmad (2007), Eri, Hadi e Slamet (2018), Khayet, Zahrim e Hilal (2011), Mohtar *et al.* (2017), Omar, Rahman e Ahmad (2008), Paula *et al.* (2018) e Prasad (2009). As variáveis independentes e dependentes utilizadas por esses autores são resumidas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Variáveis independentes e dependentes utilizadas na MSR por diversos autores.

Referência	Variáveis independentes	Variáveis dependentes	Delineamento fatorial
Bhatia, Othman e Ahmad (2007)	Dosagem de floculante (NALCO 7751) (mg L ⁻¹) Tempo de sedimentação (min) Dosagem de <i>M. oleifera</i> (mg L ⁻¹) pH	Recuperação de lodo (wt%) SST (mg L ⁻¹)	2 ⁴
Eri, Hadi e Slamet (2018)	Gradiente de velocidade de floculação (s ⁻¹) Dosagem de Al ₂ (SO ₄) ₃ (g L ⁻¹) Dosagem de <i>M. oleifera</i> (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)	2 ³
Hauwa et al. (2017)	Dosagem de <i>M. oleifera</i> e <i>S. potatorum</i> (mg L ⁻¹) Tempo de sedimentação (min) pH	Biomassa de <i>Botryococcus sp.</i> recuperada (%)	2 ³
Khayet, Zahrim e Hilal (2011)	T(°C) pH Dosagem de Al ₂ (SO ₄) ₃ (g L ⁻¹)	Remoção de cor (%)	2 ³
Mohtar et al. (2017)	Concentração de caulinita (mg L ⁻¹) pH	Volume de lodo (ml g ⁻¹) Turbidez (NTU)	2 ²
Omar, Rahman e Ahmad (2008)	Dosagem de coagulante (farinha de batata e farinha de sagu) (g L ⁻¹) Tempo de sedimentação (min)	DQO (mg L ⁻¹) Turbidez (NTU)	2 ³
Paula et al. (2018)	Dosagem de <i>M. oleifera</i> (mg L ⁻¹) Dosagem de Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg L ⁻¹) Dosagem de FeCl ₃ (mg L ⁻¹)	Turbidez residual Dureza Cloreto Alumínio Ferro Volume de lodo Alcalinidade pH Cloro residual	2 ³
Prasad (2009)	Concentração de sais (NaCl e KCl) (M) pH Dosagem de <i>M. oleifera</i> (mg L ⁻¹)	Remoção de cor	2 ³

Fonte: a autora.

2.2.1 Delineamento composto central rotacional

Planejar experimentos é sem dúvida uma das fases mais importantes da investigação científica. Quando bem executado, o planejamento cria uma estrutura bem definida para o experimento (PERÁZIO, 2010). Cada combinação de níveis dos fatores corresponde a um ponto no espaço, os fatores são as variáveis independentes, controladas pelo cientista. Delineamentos experimentais do tipo 2^2 e 2^3 possuem 4 e 8 pontos, respectivamente. Esses pontos experimentais devem ser distribuídos de forma a procurar obter um bom ajuste da equação polinomial. Generalizando, experimentos com 2 níveis podem ser escritos na forma 2^k , sendo k o número de fatores.

Dentre os modelos de segunda ordem encontra-se o Delineamento Composto Central (DCC). Tal delineamento é composto, pois consiste de pontos fatoriais, centrais e axiais. Box e Draper (2007) listam esses pontos da seguinte forma:

1. n_c = pontos fatoriais com coordenada do tipo $(\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$
2. n_s = pontos axiais com coordenadas $(\pm 1, \alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm \alpha)$
3. n_0 = pontos centrais com coordenadas $(0, 0, \dots, 0)$

Os pontos centrais usualmente são repetidos, fato que melhora a estimativa de erros quadráticos. Os DCCs podem possuir propriedades de rotacionalidade e ortogonalidade, para delineamentos de primeira ordem é possível que o modelo possua as duas propriedades ao mesmo tempo. O DCC possuirá a propriedade de rotacionalidade quando:

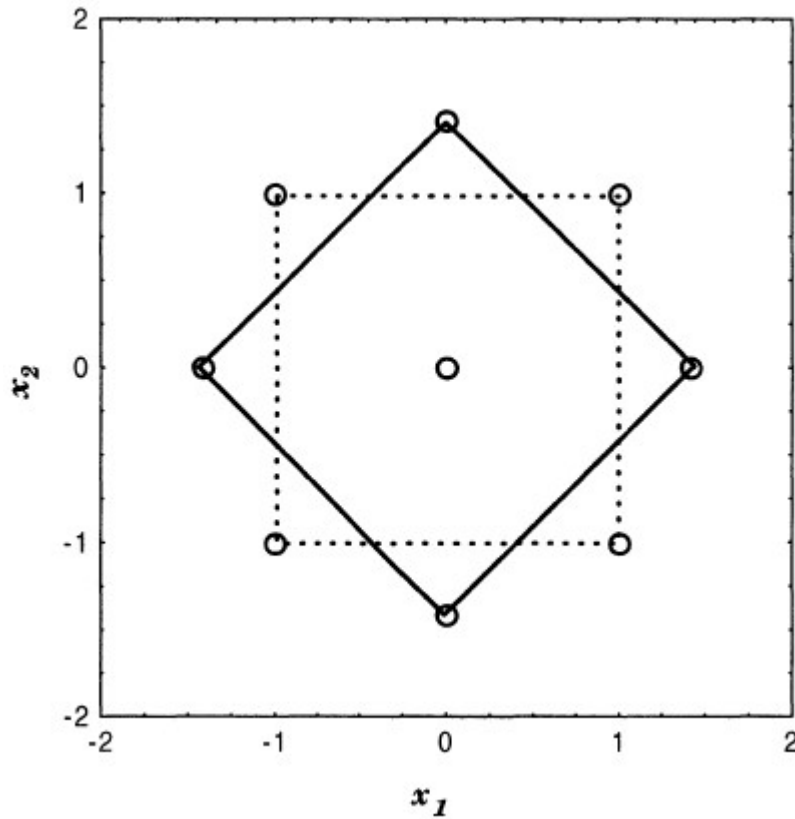
$$\alpha = \pm \sqrt[4]{2^k} \quad (2.4)$$

Em que:

α = fator de rotacionalidade;

k = número de fatores.

Perázio (2010) afirma que o DCCR pode ser utilizado para planejar tratamentos oriundos de dois a nove fatores, representados por níveis codificados dos pontos da parte cúbica (± 1) , axiais para testar o modelo de segunda ordem $(\pm \alpha)$ e por ensaios que são geralmente repetidos no ponto central (n_0). Um exemplo de um DCC, com os pontos axiais $(0, +\alpha), (0, -\alpha), (-\alpha, 0), (+\alpha, 0)$, fatoriais $(-1, 1), (-1, -1), (1, 1), (1, -1)$ e central $(0, 0)$ é exibido na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Exemplo de DCC para duas variáveis, x_1 e x_2 

Fonte: Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001).

2.2.2 Desejabilidade

Em experimentos onde são analisadas várias respostas, é importante encontrar o ponto ou região ótima em que as respostas para todos os fatores sejam satisfatórias. Proposto por Harrington em 1965, a Função de Desejabilidade, segundo Costa (2012), é uma técnica popular e bem estabelecida para determinação simultânea do ponto ótimo de um conjunto de variáveis que pode determinar a melhor performance de uma resposta ou mais.

Após ser estabelecida a resposta entre as variáveis independentes e dependentes, descrita na Equação 2.3, Maciel (2013) explica que se utiliza a formulação bilateral de Harrington na qual cada uma das respostas do conjunto original é transformada de modo que a Função Desejabilidade para cada uma das respostas d_k pertença ao intervalo $[0,1]$. O valor de d_k cresce quando a k -ésima resposta se aproxima dos limites estabelecidos. O índice global D é dado pela Equação 2.5.

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k))^{\frac{1}{k}} \quad (2.5)$$

Em que:

D = índice global de desejabilidade;

d = desejabilidade para cada variável resposta;

Y = variável resposta.

O valor do índice D é a média geométrica das repostas individuais d_k , o qual é obtido a partir do desejo para cada resposta, de maximização ou minimização, nesse caso a minimização de Y_i corresponde ao valor de maximização de $-Y_i$.

$$d_k = \begin{cases} 0 & Y_i < L_i \\ \left[\frac{Y_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq Y_i \leq T_i \\ 1 & Y_i > T_i \end{cases} \quad (2.6)$$

Em que:

L_i = menor valor aceitável para a i -ésima resposta;

T_i = maior valor aceitável para a i -ésima resposta.

No caso em que existem uma restrição de máximo e outra de mínimo, é feita a formulação bilateral. Nessa formulação, para valores indesejáveis em que $Y_i \leq L_i$ ou $Y_i \geq H_i$ o valor de d_k equivale a 0 (zero).

$$d_k = \begin{cases} 0 & Y_i < L_i \text{ ou } Y_i > H_i \\ \left[\frac{H_i - Y_i}{H_i - T_i} \right]^R & T_i \leq Y_i \leq H_i \\ \left[\frac{Y_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq Y_i \leq T_i \end{cases} \quad (2.7)$$

Para avaliar os resultados da desejabilidade global D , pode ser usado o sistema de avaliação de Harrington, descrito na Tabela 2.10. Dos autores que utilizaram do MSR, [Eri, Hadi e Slamet \(2018\)](#), [Mohtar *et al.* \(2017\)](#) e [Paula *et al.* \(2018\)](#) utilizaram a Função de Desejabilidade para determinar os valores ótimos das respostas.

Tabela 2.10 – Sistema de avaliação de Harrington para interpretar a desejabilidade, *d*.

Avaliação	Descrição
1	Máximo em satisfação e qualidade (uma melhora além desse ponto não teria valor considerável)
1,00 – 0,80	Aceitável e excelente (representa qualidade incomum ou performance muito além do disponível no mercado)
0,80 – 0,63	Aceitável e bom (representa uma melhora acima da melhor qualidade comercial)
0,63 – 0,40	Aceitável, mas pobre (qualidade é aceitável aos limites especificados mas é desejável uma melhora)
0,40 – 0,30	Limite (se existirem especificações, então a qualidade do produto encontra-se exatamente na especificação máxima ou mínima)
0,30 – 0,00	Inaceitável (materiais dessa qualidade levariam à falha)
0	Completamente inaceitável

Fonte: Adaptado de [Ribardo e Allen \(2003\)](#).

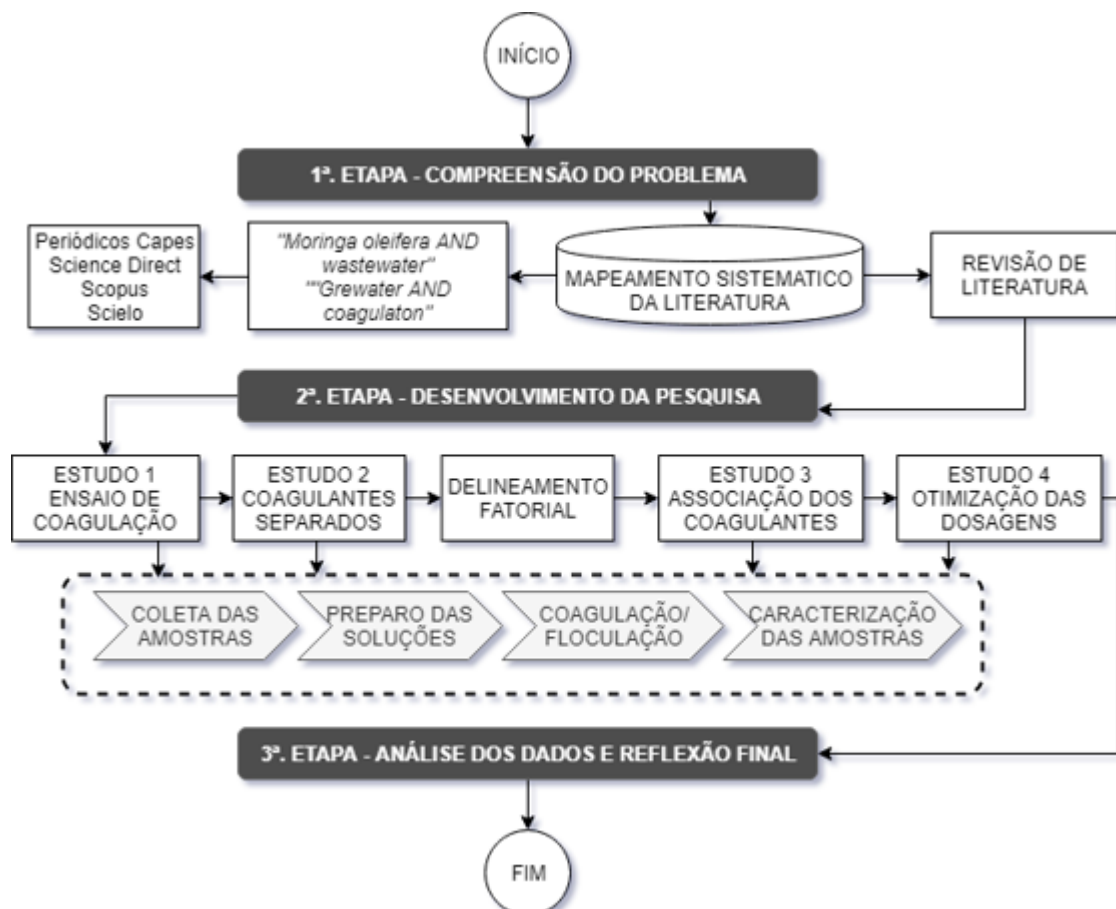
Capítulo 3

MÉTODO DA PESQUISA

3.1 Delineamento do processo da pesquisa

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma pesquisa experimental, conforme o delineamento apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Delineamento da pesquisa.



Fonte: a autora.

3.1.1 Compreensão do problema e definição do escopo

A etapa de compreensão do problema teve início com o mapeamento sistemático da literatura, o qual apresentou como resultado um banco de dados de artigos alinhados com o tema da pesquisa. O mapeamento definiu duas vertentes claras, a viabilidade do reuso de água cinza em residências e o uso da *M. oleifera* como coagulante natural para tratamento de águas residuárias.

A partir disto, definiu-se a questão da pesquisa: “É viável a utilização da *M. oleifera* como coagulante natural em associação com o coagulante químico sulfato de alumínio no tratamento de água cinza provenientes da máquina de lavar visando o reuso em residências?”. Por meio dessa questão buscou-se obter a dosagem ótima para a associação dos coagulantes que maximize o tratamento visando a possibilidade do reuso em conformidade com as normas existentes.

3.1.2 Desenvolvimento da pesquisa

Após a compreensão do problema e definição do escopo teve início o desenvolvimento da pesquisa. Nesta etapa foram estabelecidos a realização de quatro estudos, todos foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

O objetivo do Estudo 1 foi o entendimento do processo de formação de flocos para cada coagulante aplicado na água residuária da máquina de lavar. Este ensaio, que é de natureza qualitativa, permite definir as características dos flocos formados para dosagens progressivas de cada coagulante.

A próxima etapa foi a realização do Estudo 2, no qual foram definidas dosagens para cada coagulante e feito o tratamento da água cinza utilizando o processo de coagulação. Com os dados do Estudo 2 foram definidos os pontos do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e realizado o Estudo 3 testando as combinações dos coagulantes em diferentes dosagens. A partir dos resultados dos ensaios foram realizados os ajustes dos dados e obtidas as superfícies de resposta para as variáveis independentes utilizadas no estudo. A definição da dosagem ótima foi feita por meio da análise da desejabilidade global, e a realização dos experimentos para algumas possíveis dosagens constitui o Estudo 4.

3.1.2.1 Coleta das amostras e preparo das soluções

As amostras de água cinza proveniente da máquina de lavar roupas foram coletadas entre os meses de junho e novembro de 2018, em um apartamento habitado por indivíduos em idade adulta, de perfil universitário, no município de Catalão, Goiás.

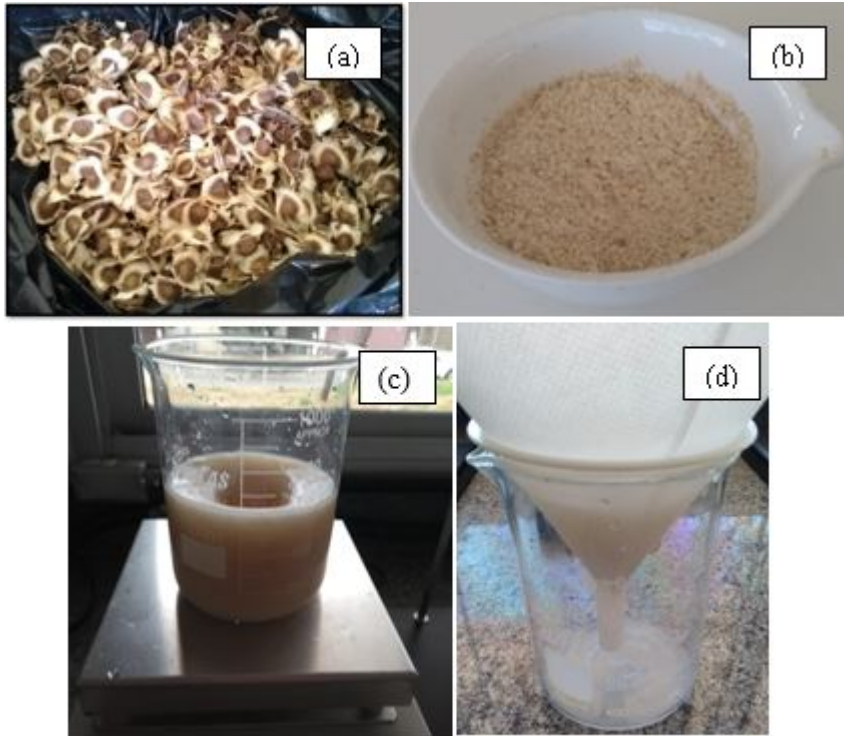
Para cada repetição do experimento era realizada uma coleta de amostras do primeiro enxague da máquina de lavar, em recipientes plásticos de 5 L de volume, desinfetado pre-

viamente com hipoclorito de sódio 1%, conforme método utilizado por Paula e Fernandes (2018).

Na lavagem das roupas foram utilizadas peças como blusas, regatas, camisas, calças e shorts, de coloração variada. Foram utilizados os seguintes produtos na lavagem das roupas: sabão em pó, amaciante líquido e alvejante em pó, todos de marcas nacionais. Para caracterizar a água cinza verificou-se os parâmetros turbidez (turbidímetro Del Lab®, modelo DLT-WV) e pH (pHmetro de bancada Kasvi®).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão. Para o preparo do extrato de moringa foram utilizadas sementes de *Moringa oleifera* coletadas nos meses de junho e julho de 2018, portanto no período de inverno, no município de Catalão, Goiás com coordenadas geográficas $-18,17^{\circ}\text{S}$ e $-47,96^{\circ}\text{O}$. As sementes foram retiradas da vagem e mantidas em um dessecador. Quando da preparação do extrato as sementes foram colocadas em estufa a uma temperatura de 60°C por um período de 24h, então descascadas e trituradas em um liquidificador, momento em que era obtida a farinha da semente de moringa. A *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio (MO+NC) foi preparada utilizando uma concentração de 50 g L^{-1} de *M. oleifera* e $0,125\text{ Mol}$ ($29,5\text{ g L}^{-1}$) de nitrato de cálcio tetrahidratado ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e água deionizada, adicionados simultaneamente, no agitador magnético (DiagTech®, modelo DT3110H) e mantidos em mistura por 30 minutos. Por fim, o extrato foi filtrado em papel filtro. O processo de preparo do extrato de moringa está descrito na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Preparo do extrato de moringa (a) sementes antes do processo (b) farinha da semente de moringa (c) mistura com nitrato de cálcio (d) filtragem.



Fonte: a autora.

A solução de sulfato de alumínio (SA) foi preparada utilizando sulfato de alumínio comercial ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) na concentração de 50 g L^{-1} . A solução de nitrato de cálcio aquoso (NC) foi preparada utilizando a concentração de $0,125 \text{ Mol}$, ou $29,5 \text{ g L}^{-1}$. Para as soluções de sulfato de alumínio e nitrato de cálcio o preparo também utilizou água deionizada e o agitador magnético. As soluções foram mantidas refrigeradas, a uma temperatura de 4°C e utilizadas 24h após o preparo. O extrato de moringa não foi utilizado por períodos maiores do que 7 (sete) dias e os coagulantes químicos por 30 dias.

3.1.2.2 Estudo 1 - Ensaio de coagulação

Visando conhecer o comportamento da formação de flocos apresentado por cada coagulante testado na água residuária estudada foram adicionadas doses gradativas para cada coagulante, separadamente, em 1 L de água cinza da máquina de lavar no agitador magnético conforme Paula e Fernandes (2018). O experimento foi feito em triplicata.

Para o sulfato de alumínio, a concentração variou de 0 a 10 ml L^{-1} (0 a $0,5 \text{ g L}^{-1}$), em intervalos de $0,5 \text{ ml}$ ($0,025 \text{ g L}^{-1}$). Em relação ao extrato da *M. oleifera* e a solução de nitrato de cálcio aquosa a concentração variou de 0 a 25 ml L^{-1} (0 a $0,738 \text{ g L}^{-1}$), em intervalos de 1 ml ($0,0295 \text{ g L}^{-1}$). Durante o experimento a amostra foi mantida 30 segundos em rotação rápida e 60 segundos sem rotação, para a visualização do efeito da adição do coagulante.

3.1.2.3 Estudo 2 - Coagulantes separados

Para os ensaios de coagulação foi utilizado o Jar Test (Milan®, modelo JT-203/6) com seis cubas. As rotações e tempos adotados utilizados para coagulação, floculação e sedimentação levaram em consideração os valores adotados por autores na Tabela 2.7. Dessa forma, os ensaios foram realizados adotando a velocidade de 100 rpm ($1,67 \text{ s}^{-1}$) por 2 minutos para rotação rápida seguidos de 40 rpm ($0,67 \text{ s}^{-1}$) por 20 minutos para rotação lenta, valores também adotados por Ndabigengesere e Narasiah (1998), Fernandes (2016) e Paula *et al.* (2018). Após a coagulação e floculação foi respeitado um período de 60 minutos para sedimentação dos flocos. A adição dos coagulantes foi realizada imediatamente após o início da rotação rápida.

O Estudo 2 teve como base os dados obtidos no ensaio de formação de flocos. As dosagens utilizadas para cada coagulante estão especificadas na Tabela 3.1. A caracterização da água tratada foi feita a partir dos seguintes parâmetros: turbidez, pH e formação de lodo.

Tabela 3.1 – Dosagens empregadas para os coagulantes no Estudo 2. As unidades de medida de concentração dos coagulantes são ml L⁻¹.

SA (ml L ⁻¹)	MO+NC (ml L ⁻¹)	NC (ml L ⁻¹)
3	5	10
6	10	20
9	15	30
12	20	40
15	25	50
18	30	60

Fonte: a autora.

3.1.2.4 Estudo 3 - Associação dos coagulantes

A modelagem do tratamento da água cinza foi feita aplicando a Metodologia das Superfícies de Resposta (MSR). Para tal, utilizou-se do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) do tipo 2^K (K = 2 fatores; 2 níveis), com a definição da matriz dos ensaios para pontos fatoriais, axiais e centrais. Os pontos fatoriais são do tipo alto (+1) e baixo (-1), por conseguinte os pontos axiais são do tipo ±α e pontos centrais (0). O valor de α, que define a rotacionalidade é dado por:

$$\alpha = \pm \sqrt[4]{2^2} = \pm 1,4142 \quad (3.1)$$

As variáveis independentes adotadas são: dosagem do extrato de *M. oleifera* (x₁) e dosagem de sulfato de alumínio (x₂), ambas em ml L⁻¹. As variáveis dependentes, ou respostas, são listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Variáveis de resposta empregadas na modelagem.

Variável	Parâmetro (unidade)
Y ₁	pH
Y ₂	Turbidez (NTU)
Y ₃	Volume de lodo (cm ³)
Y ₄	Sólidos Dissolvidos Totais (mg L ⁻¹)

Fonte: a autora.

3.1.2.5 Estudo 4 - Otimização das dosagens

Após a realização dos experimentos, os valores obtidos foram utilizados para fazer a regressão não linear e construção do modelo. Por fim, foi realizada a análise da Desejabilidade Global, a qual foi classificada conforme a Tabela 2.10, obtendo os valores ótimos para o modelo.

A caracterização das amostras no Estudo 4 verificou os seguintes parâmetros: pH, turbidez, volume de lodo, sólidos dissolvidos totais, cloro residual e coliformes termotolerantes. A análise do cloro residual foi realizada utilizando o fotocolorímetro modelo AT 100P II Alfakit®, através do método DPD.

Os coliformes termotolerantes foram determinados pelo método do número mais provável (NMP), realizado no Laboratório de Microbiologia do Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão. Foram escolhidas duas amostras com melhores resultados após o tratamento e a amostra de água cinza sem tratamento. O ensaio consistiu na realização de duas etapas analíticas, o teste presuntivo e o confirmativo. Foram realizadas três séries de diluição com cinco tubos cada. O Índice de NMP foi determinado com base nas tabelas da Norma Técnica L5.202 da (CETESB, 1997).

3.1.3 Análise dos resultados

Para a análise dos resultados, foram considerados os limites dos parâmetros constantes em ABNT (1997) e as recomendações de Sautchuk *et al.* (2005), apresentados na Tabela 3.3. As melhores dosagens dos coagulantes estudados no Estudo 2 foram determinadas com base na análise de variância feita no software Sisvar 5.7®, e comparação de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p = 0,05$). A análise da associação entre os coagulantes foi feita por meio da Análise de Variância (ANOVA), com significância $p = 0,05$, no software Statistica 10.0®. Para a associação dos coagulantes, a dosagem ótima foi definida por meio da análise da desejabilidade global.

Tabela 3.3 – Classes e parâmetros de qualidade da água de reuso.

Referência	Classe	pH	Turbidez (NTU)	SDT (mg L ⁻¹)	Cloro residual (mg L ⁻¹)	Coliformes fecais (NMP 100 ml ⁻¹)
ABNT (1997)	Classe 1	6,0 – 8,0	≤ 5	≤ 200	0,5 – 1,5	≤ 200
	Classe 2	-	≤ 5	-	≥ 0,5	≤ 500
	Classe 3	-	≤ 10	-	-	≤ 500
Sautchuk <i>et al.</i> (2005)	Classe 1	6,0 – 9,0	≤ 2	≤ 500	-	N.D

Fonte: a autora.

Os possíveis destinos das águas de reuso constantes em ABNT (1997) são:

- Classe 1 - Lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto com a água;
- Classe 2 - Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins;

- Classe 3 - Reuso nas descargas das bacias sanitárias.

A Classe 1, definida por [Sautchuk *et al.* \(2005\)](#), se refere ao uso em descargas de bacias sanitárias, lavagem de pisos, roupas, veículos e fins ornamentais.

Capítulo 4

RESULTADOS

A qualidade da água cinza obtida neste estudo é apresentada na Tabela 4.1, em conjunto com valores obtidos por outros autores para água cinza da máquina de lavar.

O valor encontrado para a turbidez está dentro da faixa reportada por Ghaitidak e Yadav (2013) e Boyjoo, Pareek e Ang (2013), entretanto, o valor do pH está abaixo dos valores encontrados pelos referidos autores, os quais reportaram valores alcalinos. Essa diferença pode ser devido aos tipos de produtos químicos utilizados no processo de lavagem das roupas.

Tabela 4.1 – Valores da água cinza sem tratamento.

Parâmetro	Este trabalho	Manouchehri e Kargari (2017)	Ghaitidak e Yadav (2013)	Boyjoo, Pareek e Ang (2013)
pH	6,4 – 7,3 *	9,3–10,0	8,3–9,3	9,3–10,0
Turbidez (NTU)	73,2 – 99,1 *	14–400	328 – 444	50 – 210
SDT (mg L ⁻¹)	360 – 463 **	400 – 6000	2140 – 2444	-
Cloro (mg L ⁻¹)	0,54 ***	-	-	-
Coliformes termotolerantes (NMP 100 ml ⁻¹)	11 ***	2E2 – 4.2E6	2E2 – 4,2E6	2,3E3 – 3,3E3

* Estudos 1, 2, 3 e 4.
 ** Estudos 3 e 4.
 *** Estudo 4.

Fonte: a autora.

4.1 Estudo 1 - Ensaio de coagulação

Nas Figuras 4.1 a 4.3 são apresentados os resultados do ensaio da formação de flocos para as soluções de sulfato de alumínio (SA), *M. oleifera* extraída em nitrato de cálcio (MO+NC) e nitrato de cálcio aquoso (NC).

Figura 4.1 – Comportamento da formação de flocos em função da adição de SA.

SULFATO DE ALUMÍNIO (SA)	
DOSAGEM (ml L⁻¹)	OBSERVAÇÃO VISUAL
0 – 1,0	
1,50	
2,0 – 2,5	
3,0 – 5,0	
5,5 – 10,0	

Fonte: a autora.

Figura 4.2 – Comportamento da formação de flocos em função da adição de MO+NC.

<i>M. Oleifera</i> EXTRAÍDA EM NITRATO DE CÁLCIO (MO+NC)	
DOSAGEM (ml L⁻¹)	OBSERVAÇÃO VISUAL
0 – 7,0	
8,0 – 9,0	
10,0 – 11,0	
12,0 – 13,0	
14,0 – 15,0	
16,0 – 17,0	
18,0 – 25,0	

Fonte: a autora.

Figura 4.3 – Comportamento da formação de flocos em função da adição de NC.

NITRATO DE CÁLCIO (NC)	
DOSAGEM (ml L⁻¹)	OBSERVAÇÃO VISUAL
0 – 18,0	
19,0 – 25,0	

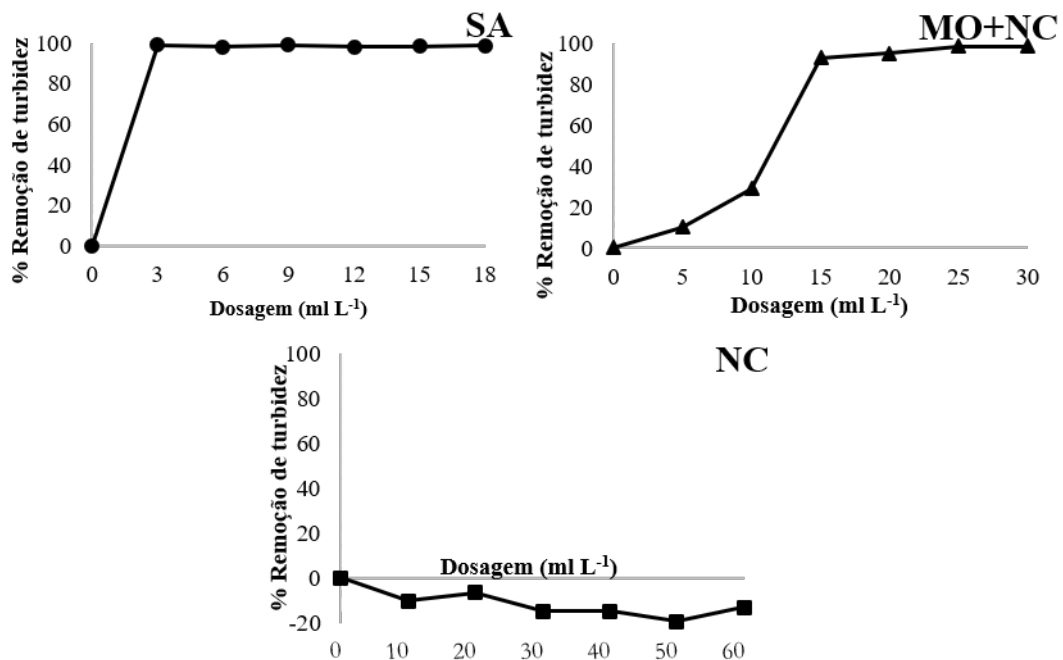
Fonte: a autora.

O SA começa a formar flocos com baixas dosagens desse coagulante, com flocos bem estruturados a partir de 3 ml L^{-1} ($0,15 \text{ g L}^{-1}$). Paula e Fernandes (2018) observaram o início da formação de flocos do SA a partir de 4 ml L^{-1} ($0,2 \text{ g L}^{-1}$), entretanto, os referidos autores trabalharam com água cinza do banheiro (chuveiro e lavatório). Na solução de MO+NC tem-se o início da formação de flocos para dosagens maiores, a partir de 8 ml L^{-1} , com flocos bem formados a partir de 16 ml L^{-1} . Na solução com NC ocorreu apenas formação de flocos incipiente a partir de 20 ml L^{-1} ($0,59 \text{ g L}^{-1}$), porém não houve mudanças nas suas características ao longo do tempo.

4.2 Estudo 2 - Coagulantes separados

Na Figura 4.4 é apresentada a porcentagem de remoção da turbidez para as seguintes soluções: SA, MO+NC e NC. Para o SA, com 3 ml L^{-1} ($0,15 \text{ g L}^{-1}$) a turbidez residual encontrada foi de 0,99 NTU, os valores apresentaram pouca variação com o aumento da dosagem. Para a MO+NC, a partir de 15 ml L^{-1} o percentual de remoção de turbidez obtido foi superior a 90%, estabilizando em 20 ml L^{-1} na turbidez residual de 1,17 NTU.

Figura 4.4 – Variação da redução de turbidez, em porcentagem, para SA, MO+NC e NC. Os valores negativos indicam que houve um aumento na turbidez testada com a solução NC.



SA - Sulfato de Alumínio; MO+NC – *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio; NC – Nitrato de Cálcio

Fonte: a autora.

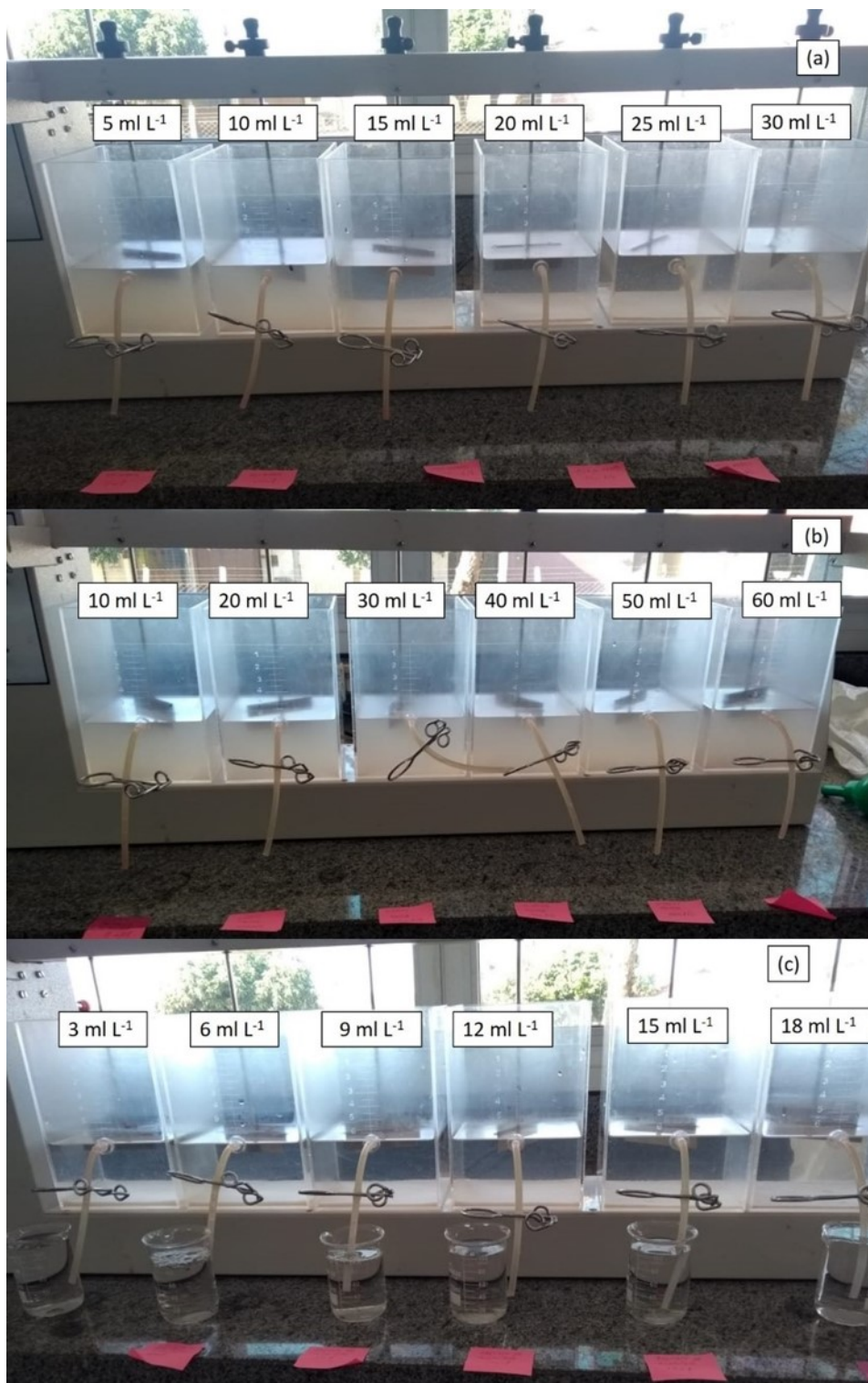
Para o NC, não ocorre a interação entre as partículas da solução com os colóides em suspensão na água cinza, aumentando o número de sólidos suspensos, o que ocasiona o

aumento da turbidez. A amostra testemunha (referência) submetida ao processo de mistura rápida e lenta, porém sem a adição de coagulantes, também apresentou um aumento na turbidez, a qual foi elevada de 88 para 96,5 NTU. Esse fato pode ser explicado ao se observar o processo de agitação rápida e lenta que, sem um elemento agregador das partículas coloidais, pode ter causado a alteração na estrutura das mesmas, especialmente na camada difusa. Contudo, não ocorreu a reestruturação e formação de flocos, então partículas que antes poderiam ter sedimentado ficaram em suspensão e, conseqüentemente, aumentaram a turbidez.

A Figura 4.5 aponta a redução da turbidez após a sedimentação nos três ensaios. No experimento com a solução de MO+NC, até a dosagem de 10 ml L⁻¹, não ocorreu sedimentação, diferente do SA, em que a aparência da água pós-tratamento, para todas as dosagens, evidenciou a sedimentação. Já para o NC, a água permaneceu turva em todas as dosagens.

A eficiência do tratamento por coagulação na remoção de turbidez também foi observada por Noutsopoulos *et al.* (2018). O autor comparou diversos tipos de tratamento para variadas combinações de água cinza do banheiro, cozinha e lavanderia, sendo que nos sistemas de tratamento onde foi incluída a etapa de coagulação, chegou-se à maior eficácia na remoção de turbidez, sólidos solúveis, surfactantes e carbono orgânico.

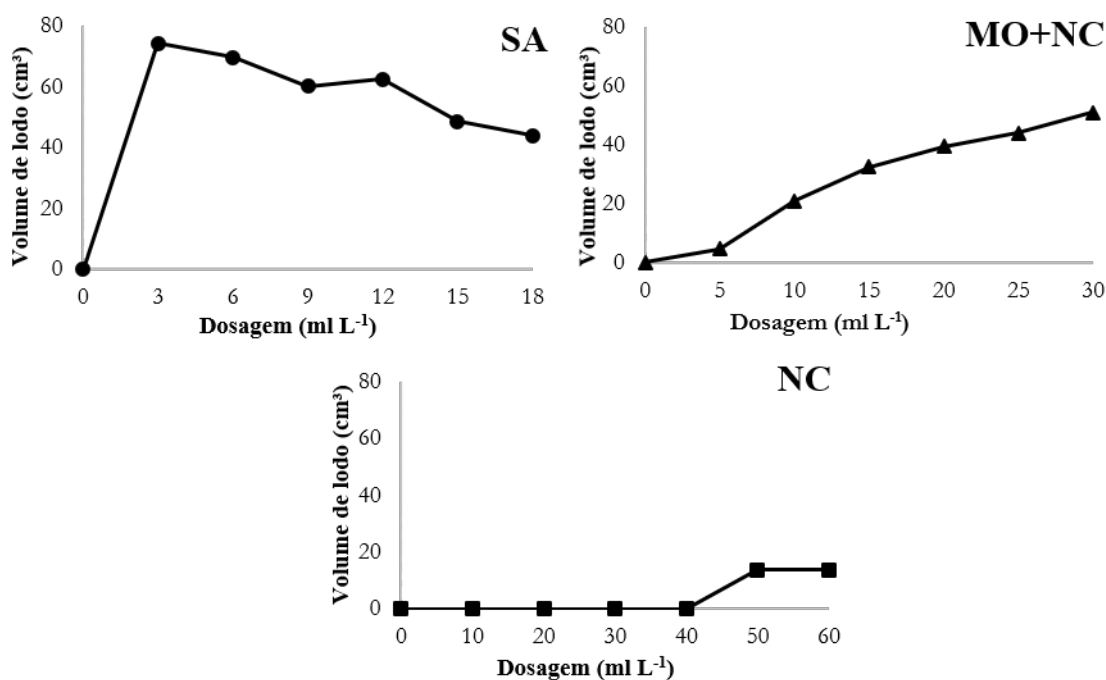
Figura 4.5 – Ensaio do jar-test: (a)MO+NC (b)NC (c)SA.



Fonte: a autora.

O volume de lodo gerado após a sedimentação é mostrado na Figura 4.6. O SA e a MO+NC apresentaram comportamento inverso, para o sulfato, à medida que a dosagem aumentava, ocorria a redução no volume de lodo gerado. O tratamento com NC não produziu lodo até a dosagem de 50 ml L^{-1} ($1,475 \text{ g L}^{-1}$); a não formação de lodo pode ser explicada porque não foi observada a ocorrência do processo de coagulação, portanto as partículas coloidais não foram reagregadas e sedimentaram. A partir da dosagem de 50 ml L^{-1} , entretanto, ocorreu o processo de precipitação devido a supersaturação da amostra, levando à formação do precipitado.

Figura 4.6 – Variação do volume de lodo para SA, MO+NC e NC.



SA - Sulfato de Alumínio; MO+NC – *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio; NC – Nitrato de Cálcio

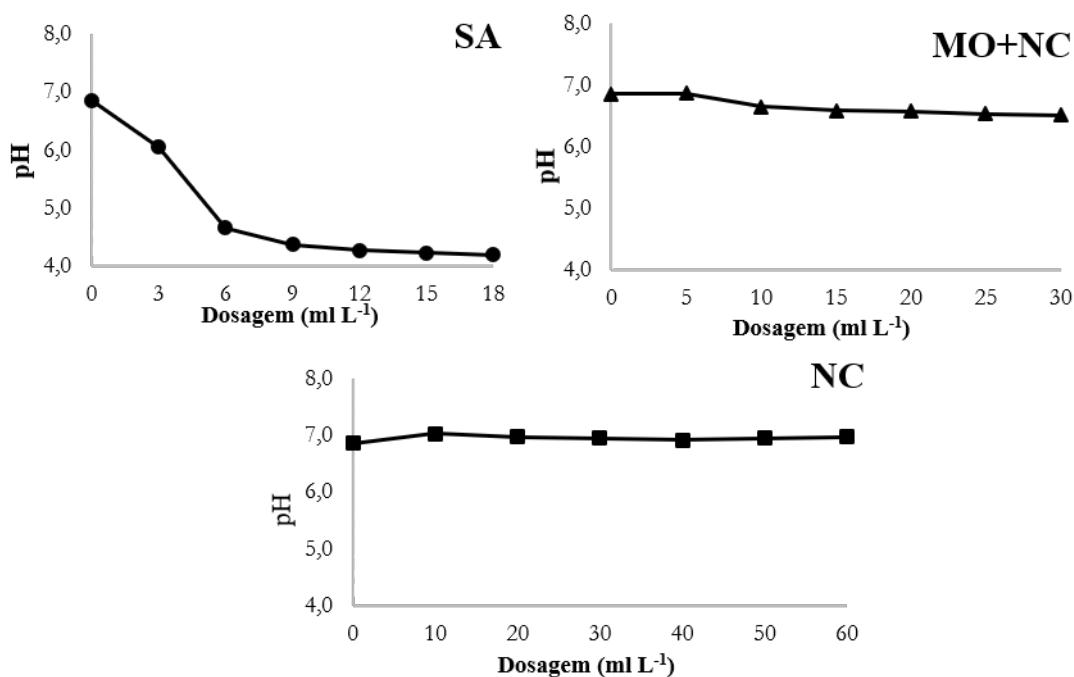
Fonte: a autora.

Paula e Fernandes (2018) estudaram o efeito da associação do sulfato de alumínio e cloreto férrico no tratamento da água cinza. Nos gráficos da superfície de contorno para o volume de lodo apresentados pelos referidos autores, para valores nulos de cloreto férrico, a área se torna uma parábola com concavidade voltada para cima, ou seja, conforme a dosagem de sulfato de alumínio aumenta, o volume de lodo diminui até a faixa de 8 a 12 mg L^{-1} , quando começa a aumentar novamente. A redução de lodo ocorrida com o aumento da dosagem de sulfato de alumínio também foi observada neste trabalho e é possível que em dado momento este volume gerado viria a reduzir novamente. Paula *et al.* (2018) observaram efeito inverso em um estudo com água residuária de usina de concreto: o aumento da dosagem do sulfato de alumínio implicou no aumento do volume de lodo. Assim, é possível que este valor esteja relacionado ao tipo de água residuária.

Para MO+NC, o efeito diretamente proporcional entre lodo e dosagem, à medida que a turbidez é reduzida é justificado, pois ainda existem partículas a sedimentar. Porém, quando o valor da turbidez residual é estabilizado, o aumento no lodo se justifica, pois todo o coagulante adicionado passa a não reagir mais e precipita. Os resultados do volume de lodo com a utilização de SA indicam a importância da análise dos sólidos dissolvidos e solúveis, visando verificar se o aumento do coagulante ocasiona aumento do teor de sólidos na amostra, em detrimento da geração de lodo.

Na Figura 4.7 é apresentada a variação no pH para cada dosagem de cada solução. O tratamento com sulfato de alumínio provocou uma queda acentuada no pH da água cinza, de 6,73 para 4,20. Uma leve queda foi observada no pH da solução de MO+NC, de 6,73 para 6,52. Para a solução de NC, o pH para a dosagem de 60 ml L⁻¹ (1,77 g L⁻¹) foi de 6,97.

Figura 4.7 – Variação do pH, para SA, MO+NC e NC.



SA - Sulfato de Alumínio; MO+NC – *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio; NC – Nitrato de Cálcio

Fonte: a autora.

Valverde *et al.* (2013), ao estudarem o uso da *M. oleifera* e do sulfato de alumínio, não observaram variações significativas no pH da água bruta, com turbidez inicial de 73 NTU, tratada com *M. oleifera* extraída em solução de água destilada, condizendo com o resultado encontrado no presente estudo. Resultados semelhantes foram encontrados por Prasad (2009).

Ainda a respeito do pH, Valverde *et al.* (2013) que realizaram o preparo da solução de *M. oleifera* utilizando apenas água destilada, verificaram que o maior índice de remoção de turbidez e cor ocorre na faixa de pH em torno de 4 a 5. Entretanto, Prasad (2009) que prepa-

rou o extrato utilizando cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl), verificaram que os valores máximos de remoção de cor ocorrem para o pH com valor igual a 7, para a água residuária de uma destilaria. Esses resultados podem indicar que, para soluções de *M. oleifera* combinadas com sais, a maior eficácia do tratamento se dá em valores de pH neutros. Portanto, no presente estudo, os altos índices de remoção de turbidez provavelmente foram obtidos devido ao valor do pH da água da máquina de lavar ser 6,7 e, portanto, próximo de 7.

Os resultados obtidos por meio do teste de Scott-Knott são apresentados na Tabela 4.2. Estes testes foram feitos apenas para o SA e para MO+NC, pois o tratamento apenas com NC não foi eficiente.

Tabela 4.2 – Médias dos parâmetros pH, turbidez e volume de lodo para os coagulantes SA e MO+NC. Colunas com a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Coagulante	Dosagem (ml L ⁻¹)	pH	Turbidez residual (NTU)	Volume de lodo (cm ³)
SA	3	6,0 a	1,0 a	74,2 b
	6	4,7 b	1,8 a	69,6 b
	9	4,4 b	1,0 a	60,3 b
	12	4,3 b	1,8 a	62,6 b
	15	4,2 b	1,5 a	48,7 a
	18	4,2 b	1,1 a	44,1 a
MO+NC	5	6,8 a	79,0 c	4,6 a
	10	6,6 a	62,6 b	20,9 b
	15	6,6 a	6,0 a	32,5 c
	20	6,6 a	4,0 a	39,4 c
	25	6,5 a	1,2 a	44,1 c
	30	6,5 a	1,2 a	51,0 c

Fonte: a autora.

A turbidez residual para o tratamento utilizando SA não apresentou significância ($p = 0,74$), ou seja, a variação da dosagem não afeta significativamente os valores de turbidez residual, o que pode ser explicado pelas altas taxas de remoção de turbidez obtidas com baixas dosagens e a estabilização dessas taxas mesmo com o aumento das dosagens. A dosagem de SA que apresenta os melhores resultados é a de 3 ml L⁻¹ (0,15 g L⁻¹) que, apesar de produzir maior volume de lodo, é a que apresenta melhor resultado para o pH e utiliza menor quantidade de coagulante.

O pH das amostras tratadas com MO+NC não apresentou significância ($p = 0,34$) em relação à variação da dosagem. Em relação ao volume de lodo produzido e à turbidez residual, as dosagens de 15 a 30 ml L⁻¹ não diferem entre si estatisticamente.

4.3 Estudo 3 - Associação dos coagulantes

Os resultados encontrados no Estudo 2 serviram de base para a definição dos níveis utilizados no delineamento composto central rotacional. Foi definido como ponto central do delineamento as dosagens de 2 ml L^{-1} para o sulfato de alumínio (SA) e 20 ml L^{-1} para a *M. oleifera* extraída em nitrato de cálcio (MO+NC). O nível $-\alpha$ para cada variável independente equivale à não adição de coagulante; a partir desses dois níveis foram encontrados os valores para os outros níveis, mostrados na Tabela 4.3. O fator de rotacionalidade (α) é igual a 1,4142, considerando o delineamento com 2 fatores e 2 níveis.

Tabela 4.3 – Variáveis independentes e respectivos níveis.

Variáveis independentes		Níveis considerados para as dosagens (ml L^{-1})				
		$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
X_1	MO+NC	0,0	5,86	20	34,14	40
X_2	SA	0,0	0,59	2	3,41	4

Fonte: a autora.

Os níveis definidos para cada variável permitiram a construção do modelo do tratamento associando os coagulantes. Esses níveis foram combinados entre si e o ponto central repetido 5 vezes, totalizando 13 corridas, ou ensaios. A matriz de ensaios e os resultados encontrados para cada variável dependente são apresentados na Tabela 4.4. As variáveis dependentes testadas no modelo são: pH (Y_1); turbidez (Y_2), medida em NTU; volume de lodo (Y_3), medido em cm^3 e sólidos dissolvidos totais (Y_4), medidos em mg L^{-1} .

Tabela 4.4 – Matriz de ensaios do delineamento experimental e os resultados obtidos.

Ensaio	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
1	-1	-1	6,9	85,8	0	560
2	-1	+1	5,9	0,42	69,6	584
3	+1	-1	6,8	6,7	55,68	105
4	+1	+1	5,8	3,57	69,6	1060
5	0	-α	7,1	8,93	13,92	791
6	0	+α	5,5	4,05	76,56	823
7	-α	0	6,5	98,7	6,96	469
8	+α	0	6,2	2,44	62,64	580
9	0	0	6,5	6,8	48,72	783
10	0	0	6,5	4,96	55,68	793
11	0	0	6,4	5,8	62,64	780
12	0	0	6,4	9,81	55,68	803
13	0	0	6,4	8,29	62,64	782

X1 = MO+NC
X2 = SA
Y1 = pH
Y2 = Turbidez (NTU)
Y3 = Volume de lodo (cm³)
Y4 = SDT (mg L-1)

Fonte: a autora.

São apresentados na Tabela 4.5 os modelos de regressão linear de segunda ordem para cada variável dependente do modelo, bem como os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e coeficiente de determinação ajustado (R_{ajust}^2).

Tabela 4.5 – Regressões polinomiais de segunda ordem das variáveis dependentes utilizadas na geração das Superfícies de Resposta, gráficos de Pareto e de contorno, com seus respectivos coeficientes de determinação.

Modelos Completos	R^2 (%)	R_{ajust}^2 (%)
$Y_1 = 7,0989 - 0,24928X_2 - 0,03188X_2^2$	98,82	97,97
$Y_2 = 141,0032 - 8,0542X_1 + 0,1031X_1^2 - 26,15X_2 + 1,0281X_1X_2$	89,59	82,16
$Y_3 = -50,3593 + 4,3723X_1 - 0,0448X_1^2 + 36,6142X_2 - 0,696X_1X_2$	95,37	92,06
$Y_4 = 707,773 + 9,093X_1 - 0,77X_1^2 - 116,768X_2 - 6,362X_2^2 + 11,638X_1X_2$	80,24	66,13

X1 = MO+NC
X2 = SA
Y1 = pH
Y2 = Turbidez (NTU)
Y3 = Volume de lodo (cm³)
Y4 = SDT (mg L-1)

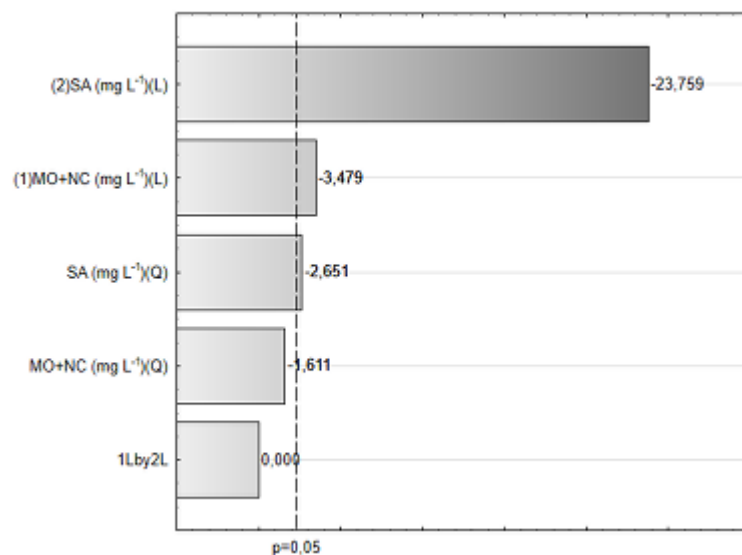
Fonte: a autora.

O valor do coeficiente de determinação R^2 para as respostas pH (Y_1), turbidez (Y_2) e volume de lodo (Y_3) são superiores a 89%, demonstrando que para estas respostas as dosagens de coagulante apresentam um elevado grau de explicação do modelo. Por outro lado, para os sólidos dissolvidos totais (Y_4) o valor deste coeficiente foi de 80,24%, indicando, portanto, um menor grau de explicação do modelo para esta variável.

Os valores do R_{ajust}^2 , com exceção dos sólidos dissolvidos totais, se aproximaram dos valores do R^2 . Como esse indicador ajustado, de certa forma, penaliza os modelos com variáveis de pouco poder explicativo, podendo chegar até a valores negativos, a sua proximidade com os valores do coeficiente de determinação indica o alto grau de explicação do modelo.

A análise das variáveis dependentes, ou de resposta, foi realizada quanto à influência significativa que cada uma apresenta no processo de tratamento da água cinza por coagulação por meio do gráfico de Pareto. A Figura 4.8 mostra o gráfico de Pareto para o pH. São verificados os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) das variáveis, e, ainda, a interação entre as variáveis (1Lby2L). Os efeitos que apresentam o fator $p < 0,05$ são considerados significativos. Os valores ao lado das barras são os da estatística do teste t e representam o efeito causado pela variável sobre a variável resposta.

Figura 4.8 – Gráfico de Pareto para análise do pH por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.

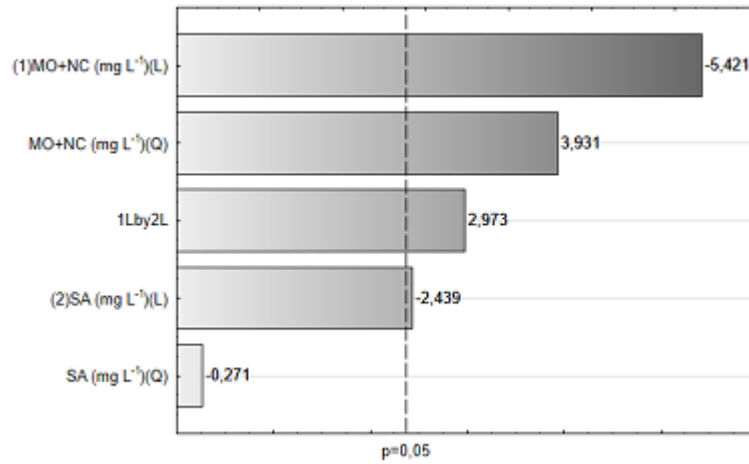


Fonte: a autora.

O efeito linear do SA possui maior influência negativa sobre o pH. O efeito linear da solução de MO+NC e o efeito quadrático do SA também foram significativos, ainda que em menor escala. A interação entre os coagulantes não produziu efeito no pH.

O gráfico de Pareto para a turbidez é mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Gráfico de Pareto para análise da turbidez por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.

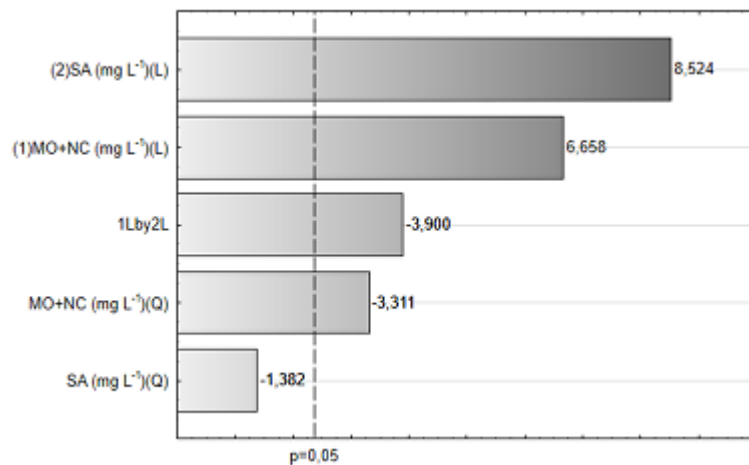


Fonte: a autora.

O efeito quadrático da MO+NC indica que com dosagens maiores do coagulante pode ocorrer o aumento da turbidez (vide valor positivo do teste t); mesma ação para o efeito de iteração entre 1Lby2L.

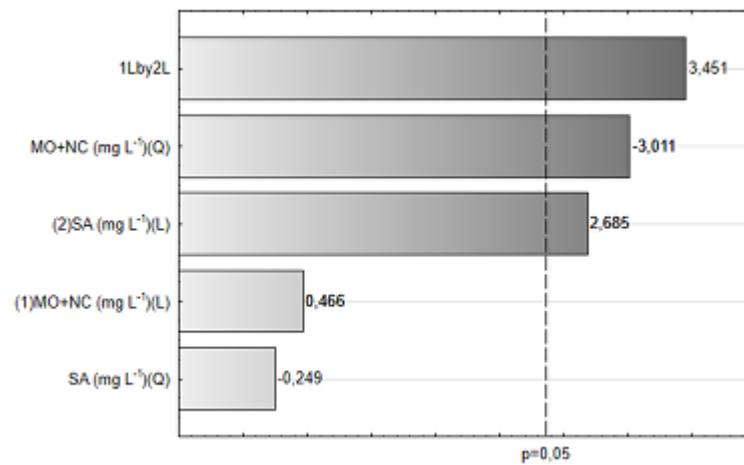
Os gráficos de Pareto do volume de lodo e sólidos dissolvidos totais se encontram nas Figuras 4.10 e 4.11

Figura 4.10 – Gráfico de Pareto para análise do volume de lodo formado, por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.



Fonte: a autora.

Figura 4.11 – Gráfico de Pareto para análise dos sólidos dissolvidos totais por meio do DCCR para a associação dos coagulantes MO+NC e SA.



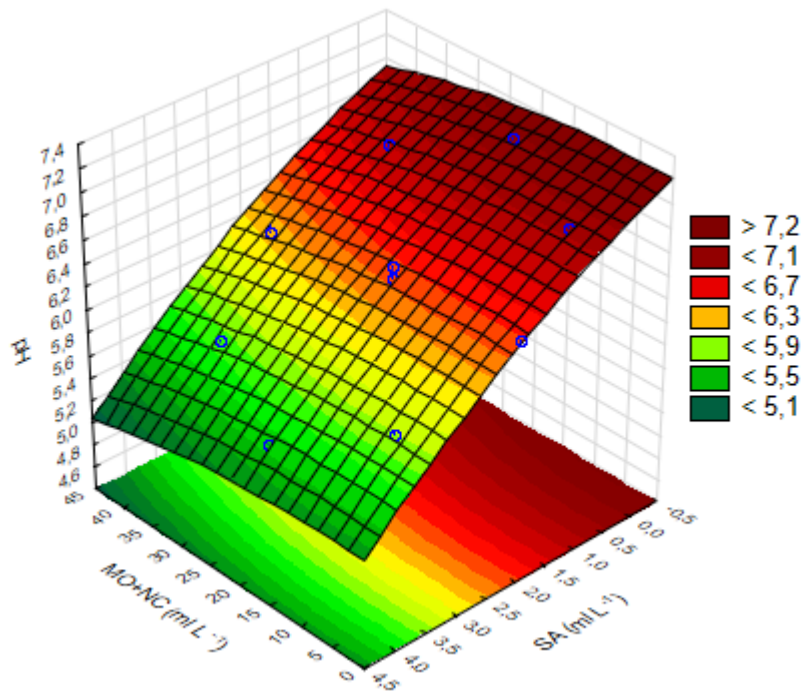
Fonte: a autora.

Nota-se que no volume de lodo produzido ocorre a predominância dos efeitos lineares dos dois coagulantes (MO+NC e SA) e da interação entre eles. O efeito linear do SA e da MO+NC atuam no aumento da produção de lodo, como indicam os valores positivos do teste t; entretanto, com a interação entre os coagulantes ocorre a redução do volume de lodo produzido.

O efeito predominante nos sólidos dissolvidos totais é a interação entre os coagulantes, com aumento no teor de sólidos. O efeito quadrático da MO+NC também atua no aumento do teor de sólidos dissolvidos totais, porém, o efeito linear do SA atua na redução deste teor.

A superfície de resposta para a variação do pH, quando considerada a interação das variáveis independentes que tiveram efeito significativo é apresentada na Figura 4.12. Os gráficos de contorno para as variáveis de resposta podem ser vistos no Apêndice B.

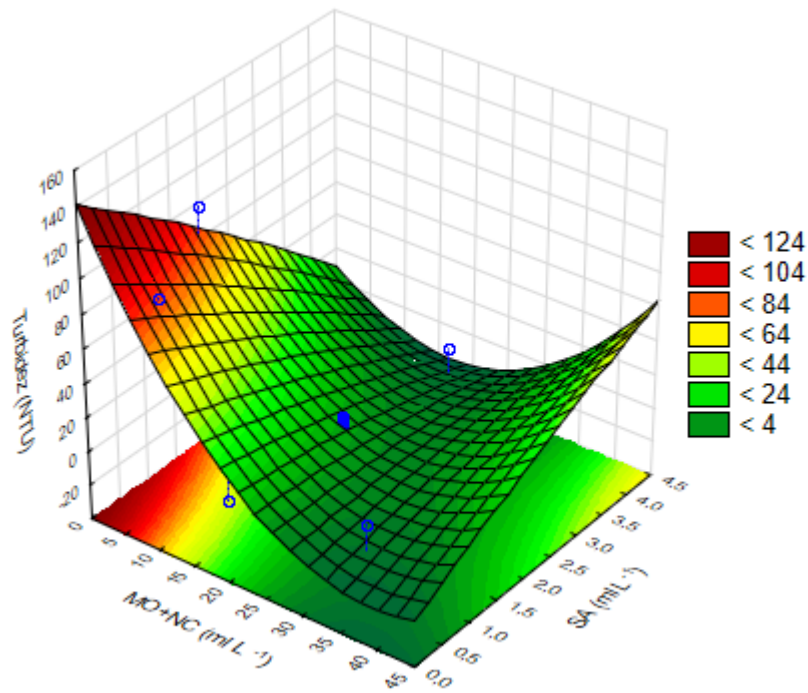
Figura 4.12 – Superfície de resposta para a variação do pH em função das variáveis independentes.



Fonte: a autora.

Nota-se que o aumento da dosagem de SA causa a redução no valor do pH, para a MO+NC este efeito não é tão pronunciado. O formato da superfície de contorno é próximo de uma função linear, confirmando o observado no gráfico de Pareto para o pH. A Figura 4.13 apresenta a superfície de resposta para a variável dependente turbidez.

Figura 4.13 – Superfície de resposta para a variação da turbidez em função das variáveis independentes.

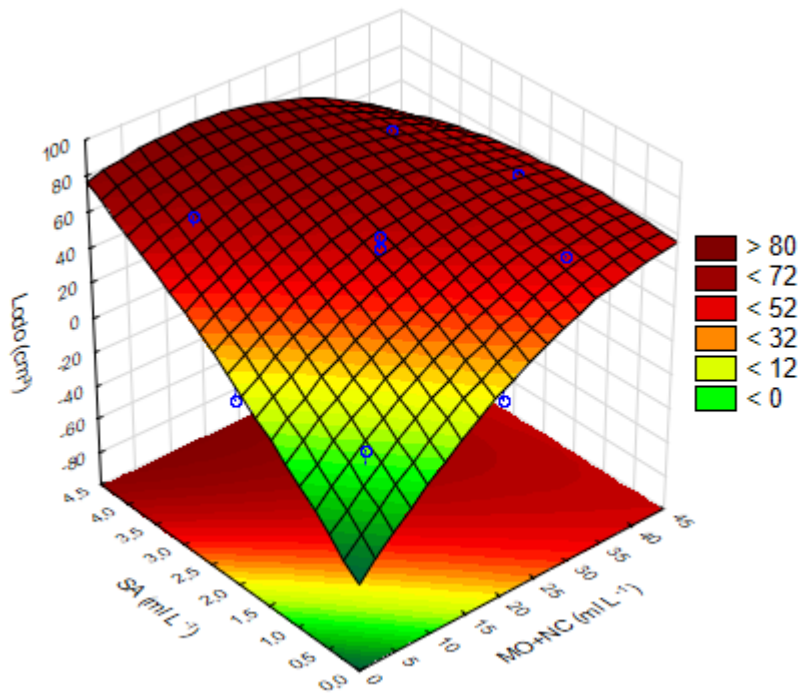


Fonte: a autora.

O SA requer menores dosagens do que a MO+NC para causar a redução da turbidez e esta redução ocorre de maneira linear. A MO+NC, por outro lado, apresenta concavidade, indicando a predominância do efeito quadrático. Para dosagens de MO+NC superiores a 40 ml L⁻¹, foi observada a inversão na concavidade da parábola, com um aumento no valor da turbidez. É possível que para a MO+NC o mecanismo de coagulação atuante seja a adsorção e neutralização de cargas, pois neste mecanismo pode ocorrer a reestabilização da solução coloidal devido à superdosagem do coagulante.

Outro fato a ser observado nesta superfície é que, com a combinação dos coagulantes, os valores de turbidez se encontram dentro da faixa <4 NTU para dosagens de MO+NC superiores a 20 ml L⁻¹. A superfície de resposta para o volume de lodo pode ser vista na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Superfície de resposta para a variação do volume de lodo em função das variáveis independentes.



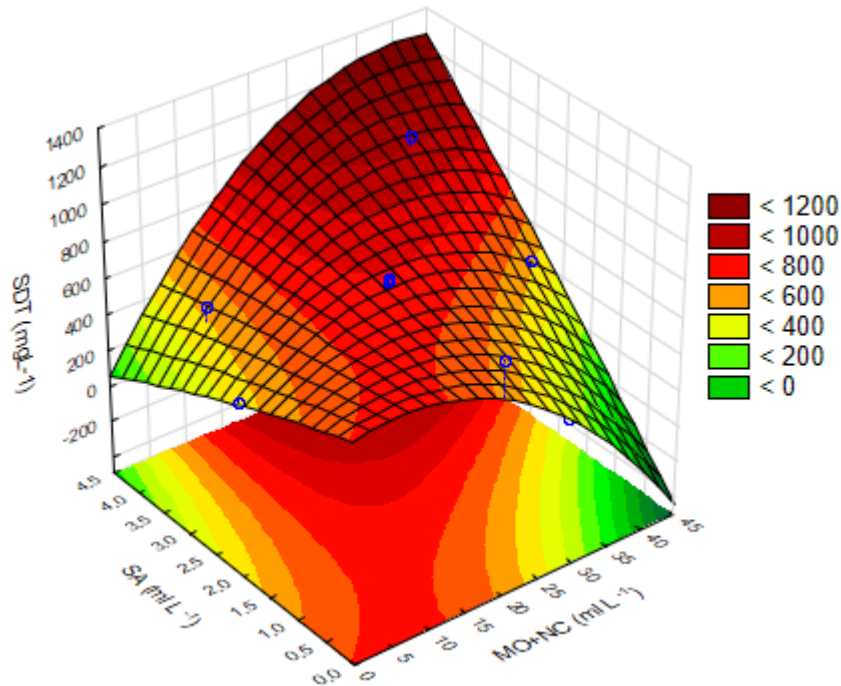
Fonte: a autora.

O volume de lodo formado aumenta de maneira diretamente proporcional à dosagem dos coagulantes, em um comportamento semelhante ao de uma parábola. Em dosagens maiores, ocorre a redução neste volume. Esse efeito fica claro no gráfico de contorno (Figura A.3), onde o volume de lodo produzido é menor para dosagens acima de 2 ml L⁻¹ de SA e 20 ml L⁻¹ de MO+NC.

Como o gráfico de Pareto para a variável lodo indicou a maior significância no efeito linear do SA, é possível que tal redução esteja associada aos efeitos deste coagulante, fato também observado nos experimentos realizados para cada coagulante em separado.

A Figura 4.15 mostra o gráfico da superfície de resposta para a variável dependente sólidos dissolvidos totais.

Figura 4.15 – Superfície de resposta para a variação do teor de sólidos dissolvidos totais formado em função das variáveis independentes.



Fonte: a autora.

Para cada coagulante observa-se o mesmo comportamento, ou seja, à medida que a dosagem aumenta, o teor de sólidos dissolvidos totais é reduzido, o que pode ser atribuído à interação do coagulante com as partículas coloidais que posteriormente sedimentam, reduzindo, assim, os sólidos dissolvidos totais na amostra.

A associação dos coagulantes, entretanto, provocam um aumento no teor dos sólidos dissolvidos totais, pois com a dosagem excessiva, parte do coagulante não interage com as partículas coloidais e fica em suspensão na solução.

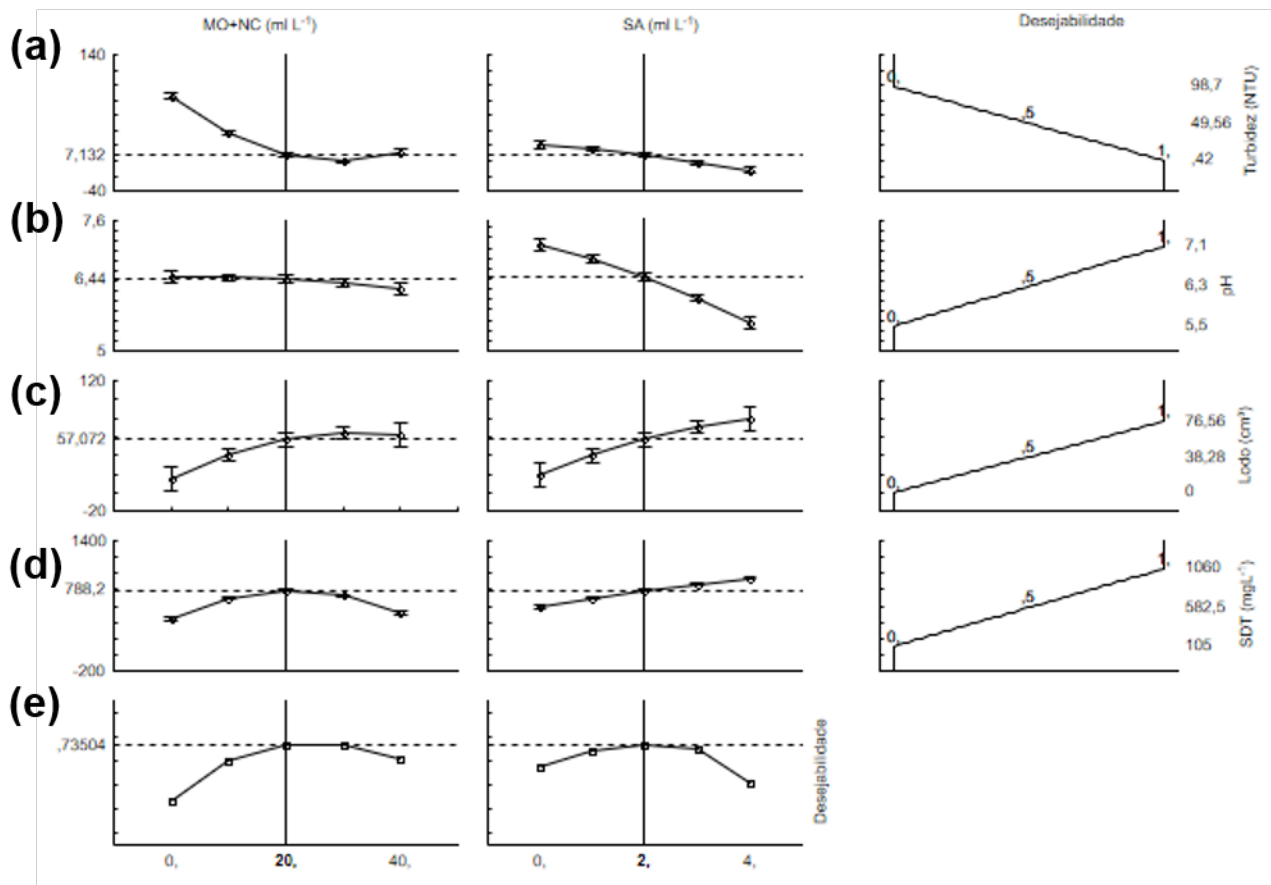
4.4 Estudo 4 - Otimização das dosagens

Os dados ajustados do delineamento experimental para as variáveis de resposta tornaram possível a análise das condições de otimização das variáveis independentes analisadas. A função desejabilidade, com os valores ótimos para as dosagens, é mostrada na Figura 4.16.

Os gráficos a, b, c e d são relativos à função desejabilidade de cada variável de resposta para cada variável independente, ou seja, a dosagem dos coagulantes. Os gráficos situados à direita dessas quatro primeiras linhas indicam a faixa de resposta de desejabilidade, contida no intervalo [0,1], sendo 1 o valor definido como desejável e 0 como indesejável. A desejabilidade global para cada variável independente é calculada a partir das desejabilidades

individuais para cada variável resposta e está no gráfico e.

Figura 4.16 – Perfil dos valores preditivos e função de desejabilidade para as variáveis de resposta.



Fonte: a autora.

Para a variável turbidez, foi definido como desejável os menores valores possíveis, portanto ao menor valor de turbidez foi atribuído o valor 1 para a desejabilidade da resposta. A faixa de valores de pH para águas de reuso da Classe 1 indicada em (ABNT, 1997) é de 6,0 a 8,0. Uma vez que, com o tratamento utilizando SA, ocorre a queda nos valores de pH para valores que podem estar abaixo desta faixa, foi definido como desejável o maior valor do pH.

Para o volume de lodo produzido e para o teor de sólidos dissolvidos totais, o valor desejável foi atribuído aos maiores valores, pois o aumento da dosagem está diretamente relacionado ao aumento destes valores, e atribuir como desejável menores teores destas variáveis ocasionaria amostras com turbidez elevada. Sendo assim, o valor da desejabilidade global encontrado foi de 0,735, descrito como aceitável e bom (representa uma melhora acima da melhor qualidade comercial) pelo sistema de avaliação de Harrington, descrito na Tabela 2.10.

Na Figura 4.16 pode-se também observar a faixa de dosagens de cada coagulante às quais está associado o valor da desejabilidade global, sendo a faixa de valores de 20 a 30 ml L⁻¹ para a MO+NC e, 1 a 3 ml L⁻¹ para o SA. A partir destes resultados, foram definidos 6 com-

binações diferentes para o estudo da dosagem ótima, com as dosagens de cada coagulante descritas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dosagens de cada coagulante para cada combinação analisada no estudo de otimização.

Combinação	Dosagem (ml L⁻¹)	
	SA	MO+NC
1	1	20
2	2	20
3	3	20
4	1	30
5	2	30
6	3	30

Fonte: a autora.

Os resultados preditos e os encontrados após os ensaios de coagulação, para cada combinação, se encontram na Tabela 4.7. Para os parâmetros pH, turbidez, sólidos dissolvidos totais e volume de lodo, foram preditos os valores que deveriam ser encontrados, conforme os modelos completos descritos na Tabela 4.5. Foram realizados ainda os ensaios de cloro residual e de coliformes termotolerantes para algumas amostras.

Tabela 4.7 – Valores dos parâmetros de qualidade preditos pela modelagem e obtidos após os ensaios para cada combinação de coagulantes.

Combinação*	pH	Turbidez residual (NTU)	Volume de lodo (cm ³)	SDT (mg L ⁻¹)	Cloro residual (mg L ⁻¹)	Coliformes termotolerantes (NMP 100 ml ⁻¹)	
Água residuária	7,2	73,20	0,00	360	0,54	11	
1	Predito	6,8	15,57	41,86	691	-	-
	Real	6,8	2,77	48,70	589	0,10	-
2	Predito	6,5	9,98	64,56	788	-	-
	Real	6,2	1,44	48,70	613	0,11	< 1,8
3	Predito	6,1	4,40	87,25	872	-	-
	Real	5,7	1,19	55,70	627	0,05	-
4	Predito	6,8	-3,14	56,22	514	-	-
	Real	6,8	4,13	41,80	766	0,00	-
5	Predito	6,5	1,55	71,96	727	-	-
	Real	6,3	1,67	55,70	770	0,00	< 1,8
6	Predito	6,1	6,25	87,69	927	-	-
	Real	5,8	0,90	69,60	780	0,02	-

*Ver Tabela 4.6

Fonte: a autora.

As combinações 3 e 6 apresentaram pH inferior a 6, portanto não se enquadram na Classe 1 da NBR 13969 (ABNT, 1997) que requer pH entre 6 a 8 e Classe 1 de Sautchuk *et al.* (2005) que exige valores de pH entre 6 e 9, ambas descritas na Tabela 3.3. As demais combinações se encontram nesta faixa de pH. Os valores de pH encontrados ficaram próximos aos valores preditos, devido ao elevado grau de ajuste da variável de resposta.

Dados os valores encontrados para a turbidez residual, os valores encontrados para as combinações podem ser classificados dentro da Classe 1 da NBR 13969 (ABNT, 1997), porém ao analisar estes resultados quanto à Classe 1 de Sautchuk *et al.* (2005), nas combinações 1 e 3, os quais utilizaram dosagens menores de SA (1 ml L⁻¹), os valores ficaram acima de 2 NTU.

O teor de sólidos dissolvidos totais (SDT) de todas as amostras aumentou com o tratamento e os valores encontrados não se enquadram na Classe 1 tanto da NBR 13969 (ABNT, 1997), quanto de Sautchuk *et al.* (2005). É possível que a introdução da etapa de filtração após a coagulação reduza o teor de SDT presentes na água.

O tratamento por coagulação, para todas as amostras, reduziu o valor de cloro residual nas amostras para valores inferiores aos necessários para as Classes 1 e 2 da NBR 13969 (ABNT, 1997). Neste caso seria necessário realizar a cloração da água.

A amostra de água cinza da máquina de lavar sem tratamento (água residuária) apre-

sentou baixo teor de coliformes termotolerantes, e para as combinações em que foi realizada a análise de coliformes, foi observada a redução do valor inicial de 11 NMP 100 ml⁻¹ para 1,8 NMP 100 ml⁻¹. É importante mencionar que este valor de 1,8 NMP 100 ml⁻¹ é o menor valor existente nas tabelas da Norma Técnica L5.202 da (CETESB, 1997), mesmo para nenhum tubo com reação positiva, como foi o caso das amostras das combinações 2 e 5 do experimento. Sendo assim, quanto ao valor de coliformes termotolerantes encontrados, as amostras analisadas podem ser enquadradas em qualquer classe das normas observadas.

A partir disso, para a água da cinza da máquina de lavar estudada, existem duas possibilidades: a primeira é o reuso sem nenhum tratamento adicional e a segunda é que, após o tratamento por coagulação, sejam acrescentadas outras etapas.

Para a primeira hipótese, a combinação 1 foi a que apresentou o melhor resultado, pois se enquadra na Classe 3 da NBR 13969 (ABNT, 1997), indicada para reuso nas descargas de bacias sanitárias, sem necessitar de nenhum tratamento adicional e foi a que consumiu a menor dosagem de coagulante, 20 ml L⁻¹ de MO+NC e 1 ml L⁻¹ de SA.

Para a segunda hipótese, a combinação 2 é a mais recomendado, pois a água de reuso tratada pode ser utilizada para os fins previstos na Classe 1 de Sautchuk *et al.* (2005) a qual se refere ao uso em descargas de bacias sanitárias, lavagem de pisos, roupas, veículos e fins ornamentais, desde que passe pela filtração para reduzir o teor de sólidos dissolvidos totais. Ou então, caso a água tratada passe ainda por um processo de cloração, ela pode ser reutilizada para os fins previstos na Classe 1 da NBR 13969 (ABNT, 1997), indicada para lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto com a água.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A água cinza da máquina de lavar estudada apresentou faixa de valores de pH inferior às dos demais autores pesquisados, essa diferença pode ocorrer devido aos produtos utilizados e métodos de lavagem de roupas empregados. Os demais parâmetros, em especial a turbidez, indicam a necessidade do tratamento da água cinza para fins de reuso.

O ensaio de coagulação, ou Estudo 1, indicou que a solução de nitrato de cálcio (NC), sem a presença da *Moringa oleifera* (MO) não possui propriedades coagulantes, uma vez que não foi observada a formação de flocos neste estudo. Por outro lado, a associação do nitrato de cálcio com a *Moringa oleifera* (MO+NC) mostrou o início da formação de flocos para dosagens a partir de 8 ml L⁻¹.

O tratamento por coagulação feito separadamente para cada coagulante do Estudo 2 mostrou que, para o sulfato de alumínio (SA), a remoção de turbidez para valores superiores a 98% ocorre com dosagens a partir de 3 ml L⁻¹; e o valor do pH destas amostras caiu para valores inferiores a 5,0 para dosagens superiores a 6 ml L⁻¹. O índice de remoção da turbidez das amostras tratadas pela solução de MO+NC foi superior a 95 % para dosagens a partir de 20 ml L⁻¹.

O teste de Scott-Knott para os dados do Estudo 2 mostrou que, para o SA, a dosagem de 3 ml L⁻¹ apresenta os melhores resultados quando analisado o pH da amostra. As dosagens de 15 a 30 ml L⁻¹ de MO+NC não diferem entre si estatisticamente, tanto para a turbidez residual quanto para o volume de lodo produzido.

Por meio do Delineamento Composto Central Rotacional foi possível estudar os efeitos da associação dos coagulantes, SA e MO+NC, e construir os modelos completos e gráficos das superfícies de resposta para as variáveis dependentes.

O Estudo 3, de associação dos coagulantes, mostrou que o SA é o principal responsável pela redução no pH da amostra. Por outro lado, para a redução da turbidez, a maior atuação é a da MO+NC. A associação dos coagulantes se mostrou eficiente, pois o SA, apesar

de ser eficiente na remoção da turbidez, reduz bastante o pH da água e a MO+NC atua na redução da turbidez sem interferir no pH da amostra.

A partir dos resultados do Estudo 3 foram definidas 6 combinações de dosagens que deixariam o tratamento otimizado, caracterizando o Estudo 4. Os resultados deste estudo indicam que com o tratamento 1, que utiliza as menores dosagens de coagulante, ou seja, 20 ml L⁻¹ de MO+NC e 1 ml L⁻¹ de SA, é viável o reuso da água tratada para o abastecimento de descargas de bacias sanitárias. Para esta combinação, a remoção de turbidez foi de 96,22%.

É possível ainda o reuso da água em atividades como lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto com a água, desde que sejam adicionadas as etapas de filtração, para a redução no teor de sólidos dissolvidos totais, e de desinfecção.

Os resultados se basearam na norma e literatura existentes, entretanto, esta norma é destinada aos tanques sépticos e apresenta apenas alguns critérios para reuso. É necessário que sejam discutidas e elaboradas normas específicas para o reuso de água, definindo os parâmetros e valores a serem considerados.

Sendo assim, é possível afirmar que a associação do sulfato de alumínio com a *Moringa oleifera* extraída em nitrato de cálcio é viável para o tratamento por coagulação da água cinza da máquina de lavar, de forma a reduzir as dosagens de cada coagulante e atender aos critérios das normas utilizados no presente estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT. 13969: *Tanques Sépticos-Unidades de Tratamento Complementar e Disposição Final dos Efluentes Líquidos-Projeto, Construção e Operação*. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas:Rio de Janeiro, 1997. 60 p. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 63, 82, 84 e 85.

AL-JAYYOUSI, O. R. Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, v. 156, n. 1-3, p. 181–192, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 23, 27 e 30.

ANTONOPOULOU, G.; KIRKOU, A.; STASINAKIS, A. S. Quantitative and qualitative greywater characterization in greek households and investigation of their treatment using physico-chemical methods. *Science of the Total Environment*, v. 454, p. 426–432, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 28, 31 e 41.

Barros Neto, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria, Editora da Unicamp, S.* [S.l.]: Editora da Unicamp: Campinas, 2001. 401 p. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 54.

BAZZARELLA, B. B. *Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo: Vitória, 2005. 165 p. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

BHATIA, S.; OTHMAN, Z.; AHMAD, A. L. Coagulation–flocculation process for pome treatment using moringa oleifera seeds extract: optimization studies. *Chemical Engineering Journal*, v. 133, n. 1-3, p. 205–212, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

BOX, G. E. P. The exploration and exploitation of response surfaces: some general considerations and examples. *Biometrics*, v. 10, n. 1, p. 16–60, 1954. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 50.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*. 2 ed. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 857 p. Citado na página 53.

BOX, G. E. P.; YOULE, P. V. The exploration and exploitation of response surfaces: an example of the link between the fitted surface and the basic mechanism of the system. *Biometrics*, v. 11, n. 3, p. 287–323, 1955. Citado na página 49.

BOYJOO, Y.; PAREEK, V. K.; ANG, M. A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 7, p. 1403–1424, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 23, 27, 28, 30, 31 e 65.

BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. *Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS*. [S.l.]: Funasa: Brasília, 2014. 112 p. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

CETESB. *L5.202: Coliformes totais, coliformes termotolerantes e Escherichia coli - Determinação pela técnica de tubos múltiplos*. [S.l.]: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 1997. 29 p. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 85.

CHAILLOU, K. *et al.* Bathroom greywater characterization and potential treatments for reuse. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 215, n. 1-4, p. 31–42, 2011. Citado na página 28.

COSTA, S. P. d. *Aplicação de ferramentas da qualidade no desenvolvimento de métodos multiresíduos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo: São Carlos, 2012. 118 p. Citado na página 54.

DEHGHANI, M.; ALIZADEH, M. H. The effects of the natural coagulant moringa oleifera and alum in wastewater treatment at the bandar abbas oil refinery. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, v. 3, n. 4, p. 225–230, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 24, 42, 44 e 46.

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*. [S.l.]: RiMa: São Carlos, 2002. 237 p. Citado na página 43.

DIAZ, S. D. *et al.* Effect of previous coagulation in direct ultrafiltration of primary settled municipal wastewater. *Desalination*, v. 304, p. 41–48, 2012. Citado na página 41.

ERI, I. R.; HADI, W.; SLAMET, A. Clarification of pharmaceutical wastewater with moringa oleifera: Optimization through response surface methodology. *Journal of Ecological Engineering Vol*, v. 19, p. 3, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 24, 47, 51, 52 e 55.

FERNANDES, C. E. *Uso de coagulantes químicos no tratamento da água cinza*. [S.l.]: Universidade Federal de Goiás: Catalão, 2016. 47 p. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 61.

FIORI, S. *Avaliação qualitativa e quantitativa do potencial de reuso de água cinza em edifícios residenciais multifamiliares*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Passo Fundo: Passo Fundo, 2005. 135 p. Citado na página 30.

FRIEDLER, E.; KATZ, I.; DOSORETZ, C. G. Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination. *Desalination*, v. 222, n. 1-3, p. 38–49, 2008. Citado na página 42.

GHAITIDAK, D. M.; YADAV, K. D. Characteristics and treatment of greywater—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, n. 5, p. 2795–2809, 2013. Citado na página 65.

_____. Effect of coagulant in greywater treatment for reuse: selection of optimal coagulation condition using analytic hierarchy process. *Desalination and Water Treatment*, v. 55, n. 4, p. 913–925, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 31, 41 e 42.

GHEBREMICHAEL, K. A. *et al.* A simple purification and activity assay of the coagulant protein from moringa oleifera seed. *Water research*, v. 39, n. 11, p. 2338–2344, 2005. Citado na página 46.

- HAUWA, A. *et al.* Harvesting of botryococcus sp. biomass from greywater by natural coagulants. *Waste and Biomass Valorization*, p. 1–13, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 31, 42 e 52.
- JIANG, J.-Q. The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 8, p. 36–44, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 47.
- KATAYON, S. *et al.* Effects of storage conditions of moringa oleifera seeds on its performance in coagulation. *Bioresource technology*, v. 97, n. 13, p. 1455–1460, 2006. Citado na página 46.
- KHAYET, M.; ZHRIM, A. Y.; HILAL, N. Modelling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, v. 167, n. 1, p. 77–83, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 42, 47, 51 e 52.
- LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 3 ed. ed. [S.l.]: Editora Átomo: Campinas, 2010. 494 p. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 40, 41 e 43.
- MACIEL, A. C. *Avaliação da Simulação a Eventos Discretos, Projeto de Experimentos e Função Desejabilidade para verificar a viabilidade de metas estabelecidas para uma Célula de Manufatura*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá: Itajubá, 2013. 113 p. Citado na página 54.
- MAGESHKUMAR, M.; KARTHIKEYAN, R. Modelling the kinetics of coagulation process for tannery industry effluent treatment using moringa oleifera seeds protein. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 32, p. 14954–14964, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 24, 40, 43, 45 e 47.
- MANOUCHEHRI, M.; KARGARI, A. Water recovery from laundry wastewater by the cross flow microfiltration process: A strategy for water recycling in residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 227–238, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 65.
- MATEUS, G. A. P. *et al.* Evaluation of natural coagulant moringa oleifera lam. in the treatment of dairy wastewater at different ph. In: *I International Symposium on Moringa 1158*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 357–364. Citado 3 vezes nas páginas 24, 45 e 46.
- MOHTAR, S. S. *et al.* Optimization of coag-flocculation processes of a newly synthesized quaternized oil palm empty fruit bunch cellulose by response surface methodology toward drinking water treatment process application. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, n. 1, p. 191–204, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 51, 52 e 55.
- NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Quality of water treated by coagulation using moringa oleifera seeds. *Water Research*, v. 32, n. 3, p. 781–791, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 24, 42, 45 e 61.
- NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using moringa oleifera. *Water Research*, v. 29, n. 2, p. 703–710, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- NOUSOPOULOS, C. *et al.* Greywater characterization and loadings–physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of environmental management*, v. 216, p. 337–346, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 27, 28, 30, 31, 41, 42 e 68.
- OH, K. S. *et al.* A review of greywater recycling related issues: Challenges and future prospects in malaysia. *Journal of Cleaner Production*, v. 171, p. 17–29, 2018. Citado na página 27.

OKUDA, T. *et al.* Improvement of extraction method of coagulation active components from moringa oleifera seed. *Water research*, v. 33, n. 15, p. 3373–3378, 1999. Citado na página 47.

OLIVEIRA, P. C. A. *Sistema compacto de wetland construído para tratamento de águas cinzas de chuveiro para reuso em bacias sanitárias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 2018. 71 p. Citado na página 34.

OMAR, F. M.; RAHMAN, N. N. N. A.; AHMAD, A. Cod reduction in semiconductor wastewater by natural and commercialized coagulants using response surface methodology. *Water, air, and soil pollution*, v. 195, n. 1-4, p. 345–352, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

OTENG-PEPRAH, M.; ACHEAMPONG, M. A.; VRIES, N. K. Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception—a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 229, n. 8, p. 255, 2018. Citado na página 30.

PAULA, H. M. d.; ILHA, M. S. d. O. Uso da moringa oleifera no tratamento de águas residuais de usinas de concreto: mapeamento sistemático. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 1, p. 50–60, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 41.

PAULA, H. M. de; FERNANDES, C. E. Otimização do tratamento de águas cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 23, n. 5, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 59, 61, 67 e 70.

PAULA, H. M. de *et al.* Dosage optimization of moringa oleifera seed and traditional chemical coagulants solutions for concrete plant wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 123–132, 2018. Citado 8 vezes nas páginas 24, 42, 48, 51, 52, 55, 61 e 70.

PENN, R.; HADARI, M.; FRIEDLER, E. Evaluation of the effects of greywater reuse on domestic wastewater quality and quantity. *Urban Water Journal*, v. 9, n. 3, p. 137–148, 2012. Citado na página 30.

PERÁZIO, B. A. A. *Efeitos dos pontos axiais e centrais sobre a eficiência do delineamento composto central*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 2010. 57 p. Citado 3 vezes nas páginas 48, 50 e 53.

PERGORARO, D. S. *Floculação: Poliacrilamidas aceleram remoção de sólidos suspensos dos efluentes tratados*. 2016. <<https://www.petroleoenergia.com.br/floculacao-poliacrilamidas-aceleram-remocao-de-solidos-suspensos-dos-efluentes-tratados/>>. Acesso em 10 de setembro de 2018. Citado na página 40.

PIDOU, M. *et al.* Chemical solutions for greywater recycling. *Chemosphere*, v. 71, n. 1, p. 147–155, 2008. Citado na página 41.

PRASAD, R. K. Color removal from distillery spent wash through coagulation using moringa oleifera seeds: Use of optimum response surface methodology. *Journal of hazardous materials*, v. 165, n. 1-3, p. 804–811, 2009. Citado 6 vezes nas páginas 24, 40, 47, 51, 52 e 71.

REVITT, D. M.; ERIKSSON, E.; DONNER, E. The implications of household greywater treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads. *Water research*, v. 45, n. 4, p. 1549–1560, 2011. Citado na página 30.

RIBARDO, C.; ALLEN, T. T. An alternative desirability function for achieving ‘six sigma’ quality. *Quality and Reliability Engineering International*, Wiley Online Library, v. 19, n. 3, p. 227–240, 2003. Citado na página 56.

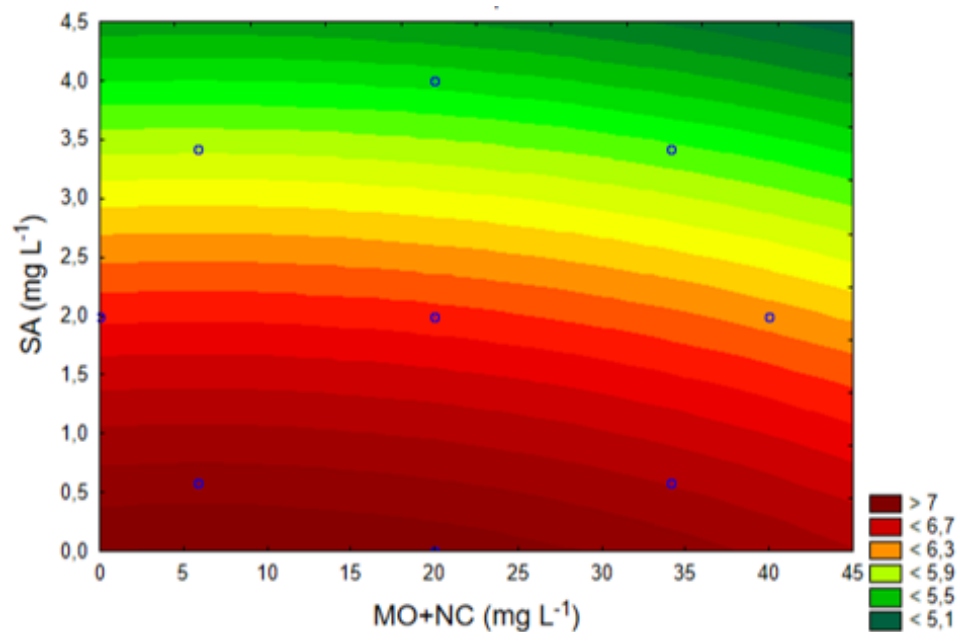
- RODRIGUES, K. C. *et al.* Mapeamento sistemático de referências do uso do bim na compatibilização de projetos na construção civil. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 13, n. 1, 2017. Citado na página 34.
- SAUTCHUK, C. *et al.* *Conservação e reúso da água em edificações - Manual da FIESP*. [S.l.]: Prol Editora Gráfica: São Paulo, 2005. 151 p. Citado 5 vezes nas páginas 28, 63, 64, 84 e 85.
- USEPA, U. S. E. P. A. *Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/618*. [S.l.]: USEPA: Washington, 2012. Citado na página 28.
- VAKIL, K. A. *et al.* Characterization of greywater in an indian middle-class household and investigation of physicochemical treatment using electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, v. 130, p. 160–166, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 23, 28, 29, 30 e 31.
- Valverde, K. C. *et al.* Moringa oleifera lam. and its potential association with aluminum sulphate in the process of coagulation/flocculation and sedimentation of surface water. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2018, p. 1–6, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- 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. 35, n. 3, p. 485–489, 2013. Citado na página 71.
- VILLASEÑOR-BASULTO, D. L. *et al.* Wastewater treatment using moringa oleifera lam seeds: A review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 23, p. 151–164, 2018. Citado na página 24.
- VON SPERLING, M. *Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2 ed. ed. [S.l.]: Editora UFMG: Belo Horizonte, 1996. 243 p. Citado na página 33.
- WWAP, U. N. W. W. A. P. *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2016: água e emprego*. [S.l.]: UNESCO: Paris, 2016. Citado na página 23.

APÊNDICE A

GRÁFICOS DE CONTORNO PARA O ESTUDO 3

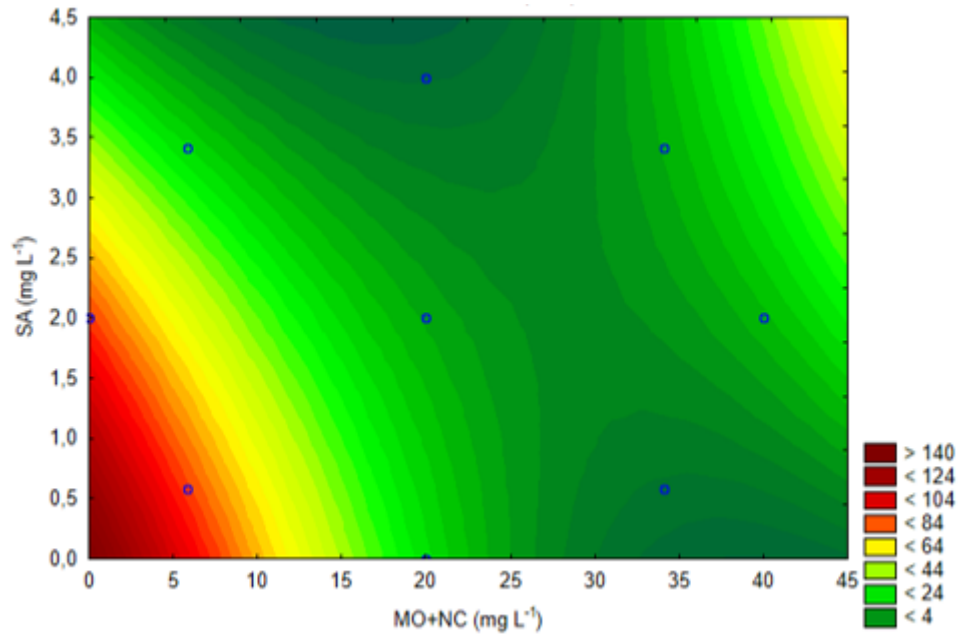
Os gráficos de contorno para a variação do pH, turbidez, volume de lodo e sólidos dissolvidos totais, quando considerada a interação das variáveis independentes que tiveram efeito significativo, são apresentados nas Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4.

Figura A.1 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação do pH em função das variáveis independentes.



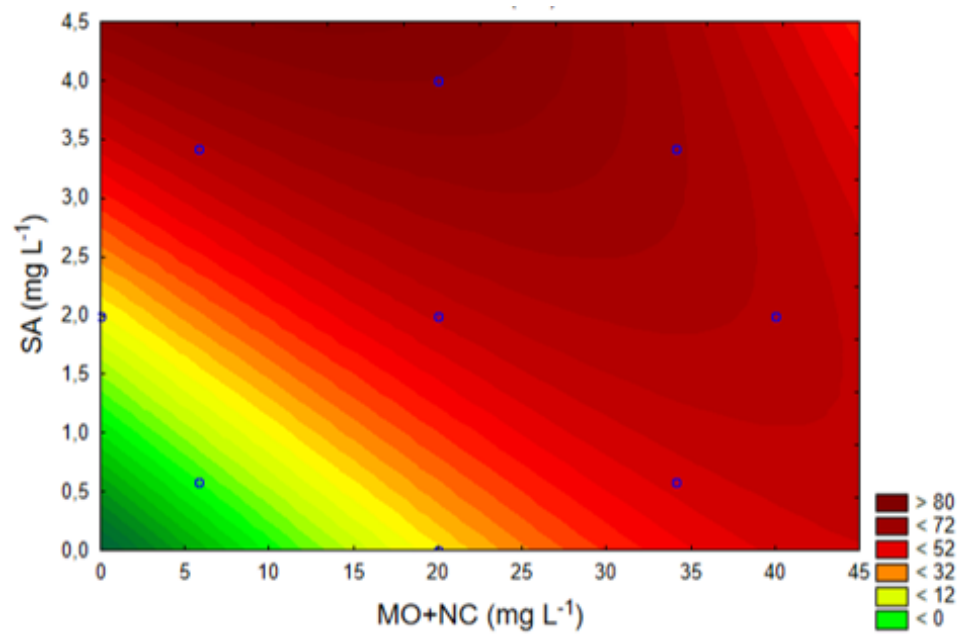
Fonte: a autora.

Figura A.2 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação da turbidez em função das variáveis independentes.



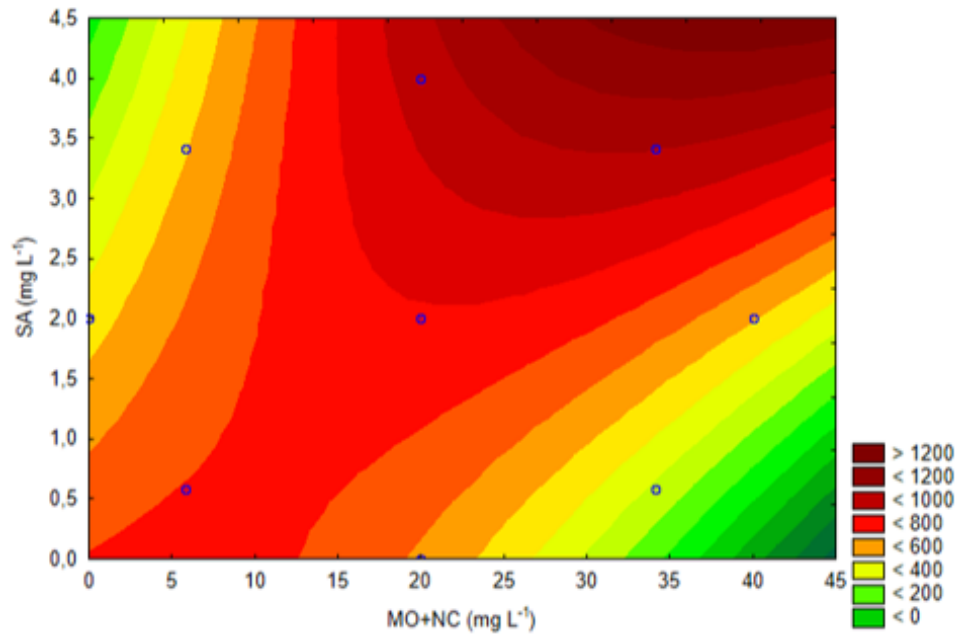
Fonte: a autora.

Figura A.3 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação do volume de lodo formado em função das variáveis independentes.



Fonte: a autora.

Figura A.4 – Gráfico de contorno e a superfície de resposta para a variação do teor de sólidos dissolvidos totais em função das variáveis independentes.



Fonte: a autora.