



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



SHAYANE DA CONCEIÇÃO COSTA

**COMPARAÇÃO DO LODO DO TRATAMENTO DE ÁGUA GERADO PELO USO
DE COAGULANTE ORGÂNICO E INORGÂNICO**

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2021

SHAYANE DA CONCEIÇÃO COSTA

**COMPARAÇÃO DO LODO DO TRATAMENTO DE ÁGUA GERADO PELO USO
DE COAGULANTE ORGÂNICO E INORGÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Conceição de
Gois Santos Michelan

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2021

SHAYANE DA CONCEIÇÃO COSTA

**COMPARAÇÃO DO LODO DO TRATAMENTO DE ÁGUA GERADO PELO USO
DE COAGULANTE ORGÂNICO E INORGÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

São Cristóvão, 10 de setembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA:

Nota: _____

Prof^a. Dr^a Denise Conceição de Gois Santos Michelan
Universidade Federal de Sergipe - UFS
ORIENTADORA

Nota: _____

Prof. Dr. Daniel Moureira Fontes Lima
Universidade Federal de Sergipe - UFS
1º EXAMINADOR

Nota: _____

Me. Taísa Andrade Barbosa
Universidade Federal de Sergipe - UFS
2º EXAMINADOR

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2021

COSTA, Shayane da Conceição. **Comparação do lodo do tratamento de água gerado pelo uso de coagulante orgânico e inorgânico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2021.

RESUMO

No processo de tratamento de água, as Estações de Tratamento de Água (ETA) geram subproduto - o lodo. Este resíduo sólido é gerado principalmente nas unidades de decantação e, em menor volume, na etapa de filtração da água. Geralmente são lançados no meio ambiente sem tratamento prévio, principalmente em corpos d'água, podendo ocasionar a poluição dos mananciais. Visando minimizar o impacto causado pelo lançamento desse resíduo no meio ambiente, os coagulantes naturais vêm sendo uma alternativa viável em substituição aos coagulantes químicos, em especial ao sulfato de alumínio, pois além de ser biodegradável, o coagulante natural produz menor volume de lodo e com menores teores de metais. Esse trabalho objetivou a comparação dos lodos resultantes do tratamento da água coletada na captação da ETA Poxim com a utilização do coagulante químico à base de sulfato de alumínio e do coagulante natural proveniente da semente de *Moringa oleifera*. Os experimentos foram realizados a partir de cinco coletas da água do rio Poxim. Os lodos foram analisados e comparados quanto aos parâmetros sólidos: sólidos totais, suspensos totais e sedimentáveis. Para a água bruta foi realizada a quantificação dos sólidos totais e suspensos totais, além da análise dos parâmetros físico-químicos, tais como: temperatura, pH, cor aparente e verdadeira, turbidez e condutividade. A análise dos parâmetros físico-químicos da água bruta, bem como a determinação dos sólidos totais e suspensos totais foram desenvolvidas com base na *American Public Health Association* (APHA). A referência metodológica utilizada para a quantificação dos sólidos sedimentáveis foi a Norma Técnica Interna SABESP NTS 013, por meio da utilização do cone *Imhoff*. Como resultados, o estudo demonstrou que houve diferenças estatisticamente significativas entre as concentrações de sólidos totais e suspensos totais do lodo produzido com o uso de sulfato de alumínio e do lodo gerado com a utilização de sementes de *Moringa oleifera* como coagulante. No entanto, no que tange os sólidos sedimentáveis, os lodos apresentaram concentrações estatisticamente iguais, ao nível de significância de 95%. O lodo gerado pelo uso de moringa, além de ser biodegradável e não-tóxico, apontou menor teor de sólidos totais, mostrando-se como alternativa viável em substituição ou redução do uso de sulfato de alumínio.

Palavras-chave: Tratamento de água; caracterização do lodo; sulfato de alumínio; *Moringa oleifera*.

ABSTRACT

In the water treatment process, the Water Treatment Plants (WTP) generate a byproduct - the sludge. This solid waste is generated mainly in the decantation units and, to a lesser extent, in the water filtration stage. It is generally discharged into the environment without prior treatment, especially into bodies of water, and can cause pollution of water sources. Aiming to minimize the impact caused by the disposal of this waste into the environment, natural coagulants have been a viable alternative to replace chemical coagulants, especially aluminum sulfate, because besides being biodegradable, the natural coagulant produces less sludge and with lower metal content. The objective of this study was to compare the sludge resulting from the treatment of the water collected from the Poxim WTP with the use of a chemical coagulant based on aluminum sulfate and a natural coagulant from *Moringa oleifera* seed. The experiments were performed from five collections of water from the Poxim river. The sludge was analyzed and compared for the solid parameters: total solids, total suspended solids and settleable solids. For the raw water, the quantification of total and total suspended solids was performed, besides the analysis of physical-chemical parameters such as: temperature, pH, apparent and true color, turbidity and conductivity. The analysis of the physicochemical parameters of the raw water, as well as the determination of total and total suspended solids were developed based on American Public Health Association (APHA). The methodological reference used for the quantification of settleable solids was the *Norma Técnica Interna SABESP NTS 013*, through the use of Imhoff cone. As results, the study showed that there were statistically significant differences between the concentrations of total and total suspended solids of the sludge produced with the use of aluminum sulfate and the sludge generated with the use of *Moringa oleifera* seeds as coagulant. However, with regard to settleable solids, the sludge presented statistically equal concentrations at the 95% significance level. The sludge generated by the use of moringa, besides being biodegradable and non-toxic, showed lower total solids content, showing itself to be a viable alternative to replace or reduce the use of aluminum sulfate.

Keywords: Water treatment; sludge characterization; aluminum sulfate; *Moringa oleifera*.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Sulfato de Alumínio
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEC	Departamento de Engenharia Civil
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNASA	Fundação Nacional da Saúde
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
MO	<i>Moringa oleifera</i>
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira
OD	Oxigênio Dissolvido
OMS	Organização Mundial da Saúde
PET	Polietileno Tereftalato
pH	Potencial de Hidrogênio
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SAMA	Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente
SESAI	Secretaria Especial de Saúde Indígena
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SVS	Secretaria de Vigilância em Saúde
UFS	Universidade Federal de Sergipe
uH	Unidades <i>Hazen</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
uT	Unidades de Turbidez
VMP	Valor Máximo Permitido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação, em planta, de SAA.....	5
Figura 2 - <i>Moringa oleifera</i> utilizada como planta ornamental na Universidade Federal de Sergipe.....	10
Figura 3 - Pontos de geração de resíduos em uma ETA convencional.	11
Figura 4 - Localização da ETA Poxim (a), e do reservatório do Rio Poxim (b).....	17
Figura 5 - Fluxograma das campanhas e parâmetros analisados.....	18
Figura 6 - <i>Moringa oleifera</i> da qual foram retiradas as vagens.	19
Figura 7 - Vagens fechadas (a); vagens abertas (b).....	20
Figura 8 - Sementes com casca após a secagem.....	20
Figura 9 - Secagem das sementes em estufa (a); resfriamento das sementes em dessecador (b).	21
Figura 10 - Sementes sendo maceradas em pilão (a); pó resultante da maceração passando na peneira nº 20 (b); pó resultante da maceração e peneiração (c).	21
Figura 11 - Agitação da solução no liquidificador (a); peneiração da solução homogeneizada na peneira nº 100 (b).	22
Figura 12 - Solução armazenada no recipiente de vidro.	22
Figura 13 - <i>Jar Test</i>	23
Figura 14 - Amostras do lodo resultante do tratamento da água com moringa (a) e com sulfato de alumínio (b) para cada coleta.....	24
Figura 15 - Amostras das cinco coletas de água bruta após ensaio no <i>Jar Test</i>	24
Figura 16 - Cone <i>Imhoff</i> com as amostras da água bruta com o coagulante natural (à esquerda) e com o coagulante químico (à direita).	27
Figura 17 - <i>Boxplot</i> dos sólidos totais, em mg.L^{-1} , presentes na água bruta.	31
Figura 18 - <i>Boxplot</i> dos sólidos totais, em mg.L^{-1} , presentes no lodo da moringa e do sulfato de alumínio.....	33
Figura 19 - <i>Boxplot</i> dos sólidos suspensos totais, em mg.L^{-1} , presentes nos lodo da moringa e do sulfato de alumínio.	35
Figura 20 - <i>Boxplot</i> dos sólidos sedimentáveis, em mL/L , presentes nos lodos da moringa e do sulfato de alumínio.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados para a água bruta.	29
Tabela 2 - Resultados dos sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST), em mg.L^{-1} , presentes na água bruta.....	31
Tabela 3 - Resultados dos sólidos totais, em mg.L^{-1} , presentes no lodo da moringa e do sulfato de alumínio.	32
Tabela 4 - Resultados dos sólidos suspensos totais, em mg.L^{-1} , presentes nos lodo da moringa e do sulfato de alumínio.	34
Tabela 5 - Resultados dos sólidos sedimentáveis, em mL/L , presentes no lodo da moringa e do sulfato de alumínio.	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Índice de atendimento total de água em cada região e no Brasil.	5
Quadro 2 - Índice de perdas de água em cada região e no Brasil.	6
Quadro 3 - Composição da semente de <i>Moringa oleifera</i>	10
Quadro 4 - Alguns parâmetros previstos na Portaria de Consolidação nº 05 e seus respectivos valores máximos permitidos.	13
Quadro 5 - Tratamento requerido em função da classificação das águas doces.	14

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE SIGLAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE QUADROS.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1 Abastecimento de água.....	4
3.2 Tratamento de água	6
3.2.1 Etapas do tratamento de água	7
3.2.1.1 Coagulação	7
3.2.1.2 Floculação.....	7
3.2.1.3 Decantação.....	8
3.2.1.4 Filtração	8
3.2.1.5 Desinfecção	8
3.2.2 Coagulantes	8
3.2.2.1 Sulfato de alumínio.....	9
3.2.2.2 Moringa oleifera	9
3.2.3 Lodo produzido no tratamento de água	11
3.3 Legislação para água tratada.....	12
3.3.1 Portaria de Consolidação nº 05 do Ministério da Saúde	12

3.3.2 Resolução CONAMA nº 357	13
3.4 Legislação para lodo	15
3.4.1 Lei nº 12.305 e Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	15
4 METODOLOGIA.....	16
4.1 Área de estudo	16
4.2 Amostragem e procedimentos	16
4.3 Análise dos parâmetros físico-químicos da água bruta	18
4.4 Preparação dos coagulantes	19
4.4.1 Coagulante químico.....	19
4.4.2 Coagulante natural.....	19
4.5 Ensaio de tratabilidade.....	23
4.6 Determinação dos sólidos.....	24
4.6.1 Sólidos totais	25
4.6.2 Sólidos suspensos totais	26
4.6.3 Sólidos sedimentáveis	27
4.7 Estudo estatístico	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Caracterização da água bruta.....	29
5.2 Sólidos totais e suspensos totais presentes na água bruta.....	30
5.3 Sólidos totais, suspensos totais e sedimentáveis presentes nos lodos	32
6 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem solicitado demanda crescente de água potável. Em contrapartida, a qualidade das águas superficiais, utilizadas para o abastecimento, vem se deteriorando devido ao desenvolvimento desordenado da malha urbana e à falta de coleta e tratamento de esgotos (TSUTIYA, 2006).

Para obter a água potável a ser consumida pela população, as estações de tratamento de água (ETAs) transformam a água imprópria para o consumo humano em água potável. Assim, realizam um conjunto de operações que adequam a água bruta aos limites microbiológicos, físicos, químicos e radioativos estabelecidos pelo padrão de potabilidade previsto na Portaria de Consolidação 05 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

No Brasil, a maioria das ETAs utilizam o sistema convencional ou de ciclo completo, que é composto pelas etapas de mistura rápida com coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008). Por meio dessas operações, as ETAs produzem água para abastecimento (água potável) e geram resíduos (CORDEIRO, 1999).

De modo geral, considera-se lodo de ETA o resíduo constituído de água e sólidos suspensos originalmente contidos na água bruta, acrescidos de produtos resultantes dos reagentes inseridos nos processos de tratamento. As duas principais fontes de lodo na ETA são os decantadores (ou flotadores) e a água de lavagem dos filtros (RICHTER, 2001).

Normalmente, os lodos gerados em decantadores de sistemas convencionais são lançados em cursos d'água próximos à ETA. Essa prática vai de encontro à legislação vigente, pois pode causar impactos negativos ao corpo receptor, tais como: aumento da quantidade de sólidos, aumento da cor e turbidez, redução da penetração de luz e, conseqüentemente, diminuição da atividade fotossintética e concentração de oxigênio dissolvido, além de assoreamentos e aumento das concentrações de ferro e alumínio, dependendo do coagulante utilizado no tratamento da água (CORDEIRO, 1999; LIBÂNIO, 2010).

A Norma Brasileira (NBR) 10.004, que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, enquadra o lodo proveniente dos sistemas de tratamento de água como resíduo sólido, o que torna inviável o seu lançamento em corpos hídricos (ABNT, 2004).

Esse resíduo deve ter destinação adequada, prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Portanto, caracterizar o

lodo produzido no tratamento de água é de suma importância para propor alternativas corretas para a sua disposição (BRASIL, 2010).

Visando minimizar os impactos causados pelo lançamento do lodo de ETA no meio ambiente, o uso de coagulantes naturais vem sendo uma alternativa viável em substituição aos coagulantes químicos, especialmente ao sulfato de alumínio. Além de serem biodegradáveis e não-tóxicos, os coagulantes orgânicos produzem lodo em menor quantidade e com menores teores de metais.

Assim, diante dessa preocupação com a quantidade de lodo gerada oriunda do tratamento de água, associada à substituição do uso de coagulantes químicos por coagulantes naturais, buscou-se caracterizar e comparar os lodos gerados com a utilização dos coagulantes *Moringa oleifera* Lam e sulfato de alumínio.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar e comparar os lodos gerados no processo de tratamento de água com coagulante inorgânico à base de sulfato de alumínio e coagulante orgânico proveniente da semente de *Moringa oleifera* Lam.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a água bruta proveniente da captação da ETA Poxim quanto aos parâmetros físico-químicos: temperatura, pH, cor aparente, cor verdadeira, turbidez e condutividade;
- Quantificar os sólidos totais e sólidos suspensos totais da água bruta;
- Caracterizar o lodo produzido durante o tratamento da água bruta com *Moringa oleifera* e sulfato de alumínio quanto aos parâmetros sólidos: sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos sedimentáveis.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Abastecimento de água

Desde que o homem passou a viver de forma sedentária, fixando-se em vilas e adotando a agricultura como meio de subsistência, a necessidade de água para atender às demandas da população e para a irrigação de suas culturas agrícolas fez com que as primeiras obras, visando o abastecimento de água, fossem construídas na Mesopotâmia e no Egito, onde ruínas de canais pré-históricos ainda existem (MAYS, 2000 *apud* TSUTIYA, 2006). E, à medida que as sociedades foram se tornando mais complexas, o uso da água foi ficando cada vez mais diversificado e exigente, em quantidade e qualidade, passando a exigir mais segurança no suprimento de água e maiores aportes tecnológicos (HELLER, 2006).

Ainda para Heller (2006), o conceito de abastecimento de água insere-se no conceito mais amplo de saneamento, que, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), pode ser entendido como o controle de todos os fatores do meio físico do homem, que exercem ou podem exercer efeitos deletérios sobre seu bem-estar físico, mental e social. Logo, além do abastecimento de água, o saneamento também compreende as ações de esgotamento sanitário, limpeza pública, drenagem pluvial e controle de vetores.

Dentre as consequências da ausência ou ineficiência do saneamento, pode-se citar a transmissão de doenças pela água, que ocorre principalmente pela ingestão desta contaminada por agentes biológicos patogênicos e por agentes químicos, que podem ocasionar efeitos crônicos e agudos. A higiene deficiente devido à insuficiência da quantidade de água também pode desencadear doenças feco-oral e infecciosas. Além disso, na ausência do fornecimento contínuo de água, a população recorre ao armazenamento de água em tambores e baldes, que se tornam locais propícios para o desenvolvimento de mosquitos transmissores de doenças (HELLER, 2006). Assim, Tsutiya (2006) ressalta que dentre as melhorias do saneamento, os sistemas de abastecimento de água são os que acarretam maior impacto na redução de doenças.

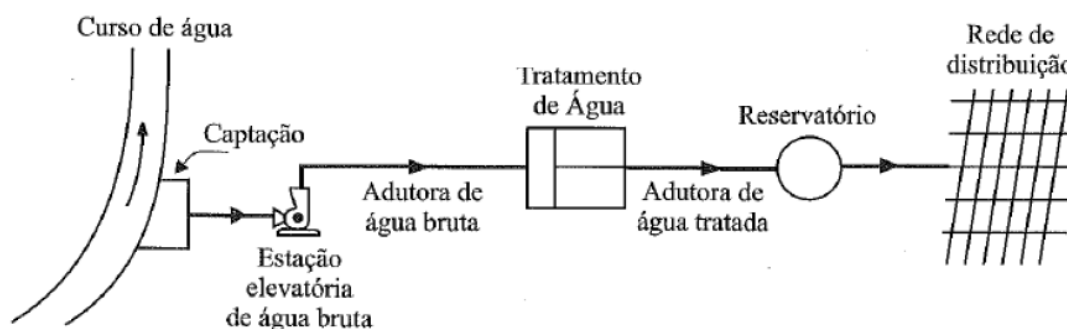
A Portaria de Consolidação nº 05 do Ministério da Saúde define o sistema de abastecimento de água para consumo humano como uma instalação composta pelo conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, destinada à produção e à distribuição canalizada de água potável para populações, sob a responsabilidade do poder público, sendo administrada em regime de concessão ou permissão (BRASIL, 2017).

Além do sistema de abastecimento de água, também existe a solução alternativa coletiva de abastecimento que, de acordo com o Decreto nº 5.440, é definida como toda modalidade de

abastecimento coletivo de água que inclui fonte, poço comunitário, distribuição por veículo transportador, instalações condominiais horizontais e verticais (BRASIL, 2005a).

O sistema de abastecimento de água (SAA) tem como objetivo principal fornecer ao usuário água de boa qualidade, em quantidade e pressão adequada, e é constituído pelos componentes manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição (TSUTIYA, 2006), ilustrados na Figura 1.

Figura 1 - Representação, em planta, de SAA.



Fonte: Tsutiya (2006)

Segundo o diagnóstico realizado em 2019 pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), 83,7% da população brasileira é atendida pelo abastecimento de água tratada (BRASIL, 2020). O Quadro 1 apresenta os valores médios dos índices de atendimento urbano e total de água em cada região geográfica e no Brasil.

Quadro 1 - Índice de atendimento total de água em cada região e no Brasil.

Região	Índice de atendimento de água (%)	
	Total	Urbano
Norte	57,5	70,4
Nordeste	73,9	88,2
Sudeste	91,1	95,9
Sul	90,5	98,7
Centro-Oeste	89,7	97,6
Brasil	83,7	92,9

Fonte: Adaptado de Brasil (2020)

Ainda de acordo com o SNIS, ao fornecer água para consumo humano, os sistemas de abastecimento têm perdas de água na distribuição, que na média nacional alcançaram 39,6% no ano de referência de 2019 (BRASIL, 2020). O Quadro 2 mostra o índice de perdas em cada região geográfica e no Brasil.

Quadro 2 - Índice de perdas de água em cada região e no Brasil.

Região	Índice de perdas de água na distribuição (%)
Norte	55,7
Nordeste	46,5
Sudeste	36,3
Sul	38,2
Centro-Oeste	31,7
Brasil	39,6

Fonte: Adaptado de Brasil (2020)

3.2 Tratamento de água

As águas naturais apresentam inúmeras impurezas, várias delas são inócuas, porém, algumas podem ser extremamente perigosas como vírus, bactérias, parasitas, substâncias tóxicas e elementos radioativos (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Desse modo, o tratamento de água visa remover organismos patogênicos e substâncias orgânicas e inorgânicas que podem ser prejudiciais à saúde (PÁDUA, 2006). Também é exigido que a água seja esteticamente agradável, sendo necessário redução de cor, turbidez, odor e sabor, para que atenda aos requisitos estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 05 (BRASIL, 2017).

As ETAs têm por objetivo tornar a água imprópria para o consumo em água potável. O Decreto nº 5.440 define como água potável aquela cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria de Consolidação nº 05 e que não ofereça riscos à saúde (BRASIL, 2005a).

De acordo com Pádua (2006), o tratamento começa na escolha da água bruta, pois os riscos sanitários e os custos envolvidos no tratamento de água contaminadas podem ser muito elevados, o que exige o emprego de técnicas mais custosas e sofisticadas.

Existem diversas técnicas de tratamento de água, destacando-se no Brasil o tratamento convencional (ou de ciclo completo) e a filtração direta. Entretanto outras técnicas também são empregadas, mas em um número relativamente pequeno, tais como a filtração lenta, a flotação e a filtração em membrana (PÁDUA, 2006).

As tecnologias de tratamento de água apresentam, basicamente, três fases: clarificação, filtração e desinfecção. A clarificação, que engloba os processos de coagulação, floculação e decantação, tem como finalidade a remoção dos sólidos suspensos e de parcela dos sólidos dissolvidos. A fase de filtração tem como função a remoção de sólidos dissolvidos e

microrganismos. Por fim, a desinfecção cumpre inativar os microrganismos ainda presentes, como vírus e bactérias (LIBÂNIO, 2010).

A escolha do processo a ser empregado no tratamento de água para consumo humano deve ser pautada em alguns critérios, sendo eles: i) Características da água bruta; ii) Custos de implantação, manutenção e operação; iii) Manuseio e confiabilidade dos equipamentos; iv) Flexibilidade operacional; v) Localização geográfica e características da comunidade; vi) Disposição final do lodo (BOTERO, 2008).

3.2.1 Etapas do tratamento de água

No Brasil, a maioria das ETAs utilizam o sistema convencional ou de ciclo completo, que é composto pelas etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008). Esse sistema realiza a remoção de partículas finas em suspensão e em solução presentes na água bruta a partir da introdução de agentes coagulantes que desestabilizam as partículas, formando flocos com tamanho suficiente para sua posterior remoção (CORDEIRO, 1999).

3.2.1.1 Coagulação

A coagulação consiste essencialmente na desestabilização das partículas coloidais e suspensas presentes na água pela conjunção de ações físicas e reações químicas entre o coagulante - geralmente um sal de alumínio ou de ferro, a água e as impurezas presentes. Este processo é realizado na unidade de mistura rápida da estação e está presente em quase todas tecnologias de tratamento de água, exceto na filtração lenta (LIBÂNIO, 2010).

Conforme Pádua (2006), as impurezas presentes na água comumente possuem carga superficial negativa em meio aquoso. Dessa forma, quando ocorre a dispersão do coagulante na água, surgem espécies hidrolisadas que reagem quimicamente com tais impurezas ou atuam sobre a superfície delas, reduzindo a força repulsiva. Assim, a aproximação e a colisão entre as partículas desestabilizadas formam flocos, os quais poderão ser removidos nas etapas de decantação e filtração.

3.2.1.2 Floculação

Para Richter (2009), a floculação pode ser definida como o processo de juntar partículas coaguladas ou desestabilizadas para formar massas maiores ou flocos, de modo a permitir sua separação por decantação e/ou filtração da água.

De acordo com a ABNT (1992), floculadores são unidades que promovem a agregação de partículas formadas na mistura rápida. Nesta unidade não ocorre a remoção de impurezas, tendo por finalidade acondicionar a água que será encaminhada aos decantadores ou aos filtros da ETA (PÁDUA, 2006).

3.2.1.3 Decantação

Este processo é realizado nos tanques de decantação ou decantadores e consiste na utilização de forças gravitacionais para separar partículas de densidade superior à da água, depositando-as em uma superfície ou zona de armazenamento. No entanto, as partículas que não foram removidas na sedimentação, sejam por seu tamanho pequeno ou por terem densidade próxima à da água, deverão ser removidas na etapa de filtração (MIRANDA; MONTEGGIA, 2007).

3.2.1.4 Filtração

A filtração é um processo físico-químico, e às vezes biológico (filtros lentos), responsável pela separação de impurezas em suspensão na água, mediante sua passagem por meio poroso. Pode ser o único processo de tratamento, como na filtração lenta, ou ser precedido pela coágulo-floculação, como na filtração direta (RICHTER, 2009).

3.2.1.5 Desinfecção

A desinfecção da água possui caráter corretivo e preventivo. Dessa forma, objetiva-se a eliminação de organismos patogênicos que possam estar presentes na água, como vírus, bactérias e protozoários. Além disso, é mantido um residual de desinfetante na água fornecida à população para atuar de forma preventiva, caso ocorra alguma contaminação na distribuição (PÁDUA, 2006).

3.2.2 Coagulantes

Os principais coagulantes utilizados em ETAs convencionais são o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o sulfato ferroso clorado, o sulfato férrico e o hidróxi-cloreto de alumínio (HCA ou PAC) (PÁDUA, 2006). Entretanto, o desenvolvimento de novos coagulantes, baseados em matérias-primas naturais biodegradáveis e abundantes na natureza, vem ganhando cada vez mais espaço nos centros de pesquisa, principalmente por se tratarem de materiais *eco friendly* (LIMA JÚNIOR; ABREU, 2018).

Diversos coagulantes orgânicos são obtidos a partir de sementes de oleaginosas. No entanto, a maioria desses coagulantes não são encontrados comercialmente no mercado

brasileiro (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011). O coagulante proveniente da semente da *Moringa oleifera* é um exemplo de coagulante natural que vem sendo utilizado na região nordeste, principalmente no semiárido, onde a escassez de água representa grande dificuldade para a população (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

De acordo com Kawamura (1991 *apud* BONGIOVANI *et al.*, 2010), os coagulantes naturais possuem várias vantagens quando comparados aos coagulantes químicos: além de serem biodegradáveis e não-tóxicos, os coagulantes naturais produzem lodo em menor quantidade e com menores teores de metais.

3.2.2.1 Sulfato de alumínio

Devido à sua eficiência em remover sólidos em suspensão e ao seu baixo custo, o sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado no tratamento de água de abastecimento. No entanto, seu uso pode tornar-se inviável para utilização no tratamento de água em áreas mais afastadas, pois seu transporte exige custos mais elevados. Outro problema associado ao uso do sulfato de alumínio é o lodo gerado no tratamento de água, que é rico em alumínio, o que dificulta a sua disposição final no meio ambiente (LO MONACO *et al.*, 2010).

Driscoll e Letterman (1988 *apud* LIMA JÚNIOR; ABREU, 2018) relata que cerca de 11% de todo o alumínio presente na água ou adicionado na forma de coagulante permanece como residual após o tratamento, sendo transportado pela rede de distribuição. Esse residual de alumínio tem sido objeto de diversos estudos científicos, pois o alumínio pode estar associado a doenças degenerativas, principalmente a doença de *Alzheimer* (GERHARDT, 2018).

3.2.2.2 *Moringa oleifera*

Pertencente à família Moringaceae, a *Moringa oleifera* é considerada uma planta perene e arbórea que possui elevada capacidade de adaptação a condições climáticas e solos áridos (LORENZI; MATOS, 2002). O gênero *Moringa* é o único representante da família Moringaceae, sendo constituído por 14 espécies, dentre as quais a *Moringa oleifera* Lam é a mais conhecida (ANWAR *et al.*, 2007).

De acordo com Souto e Maior Júnior (2018), a moringa (Figura 2) é uma planta de múltiplos benefícios que vem se difundindo ao longo dos anos nos mais variados continentes em virtude à sua capacidade de adaptação a climas quentes e secos, bem como à sua utilização em diversos setores. Gerdes (1996 *apud* SOUTO; MAIOR JÚNIOR, 2018) afirma que em algumas regiões do nordeste brasileiro, a moringa é conhecida como “Lírio Branco” e “Quiabo de Quina”, sendo encontrada, principalmente, nos estados do Ceará, Maranhão e Piauí.

Figura 2 - *Moringa oleifera* utilizada como planta ornamental na Universidade Federal de Sergipe.



Fonte: Autora (2021)

De acordo com Gallão, Damasceno e Brito (2006), dentre os elementos constituintes da moringa, a proteína é o composto encontrado em maior quantidade na semente (Quadro 3), correspondendo a cerca de 39% da massa bruta. Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995) relatam a presença de uma proteína catiônica de alto peso molecular que desestabiliza as partículas presentes na água. Portanto, essa proteína é responsável pelos processos de coagulação e floculação dos compostos que promovem cor e turbidez de águas altamente turvas (BERGAMASCO *et al.*, 2018).

Quadro 3 - Composição da semente de *Moringa oleifera*.

Composição	Semente
Umidade (%)	6,3
Açúcares solúveis (g/100g)	3,14
Oligossacarídeos (g/100g)	3,31
Amido (g/100g)	6,02
Proteínas (g/100g)	39,3
Lipídeos (g/100g)	18,8

Fonte: Gallão, Damasceno e Brito (2006)

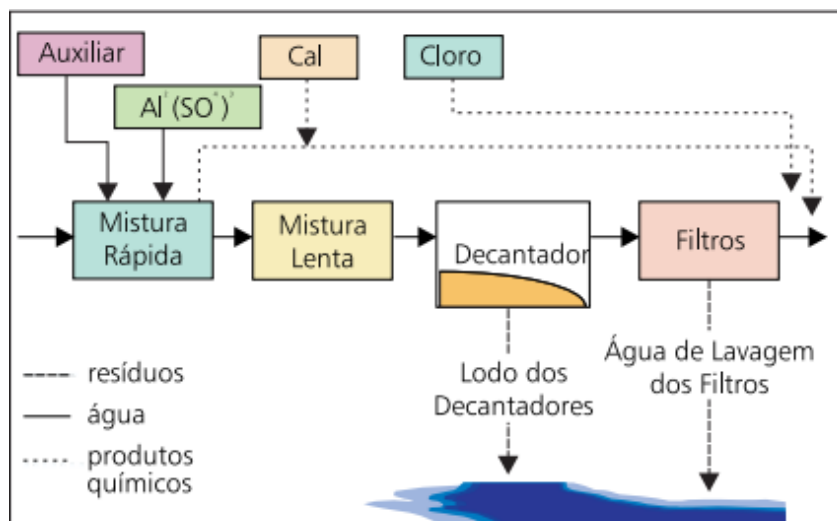
Ainda para Bergamasco *et al.* (2018), o volume do lodo produzido pelo uso da semente de moringa como coagulante no tratamento de água é de 20 a 30 % menor do que quando se utiliza o sulfato de alumínio como coagulante.

Devido à falta de água no semiárido nordestino, inerente às irregularidades da chuva e aos longos períodos de seca, é crescente a busca por alternativas para contornar a escassez. Assim, por ser abundante na região, a *Moringa oleifera* pode ser utilizada como coagulante no tratamento da água dos mananciais ainda disponíveis (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

3.2.3 Lodo produzido no tratamento de água

A indústria da água de abastecimento, quando utiliza o tratamento convencional ou de ciclo completo, transforma a água imprópria para o consumo humano em água potável e gera resíduos (CORDEIRO, 1999). De modo geral, considera-se lodo de ETA o resíduo constituído de água e sólidos suspensos originalmente contidos na água bruta, acrescidos de produtos resultantes dos reagentes inseridos nos processos de tratamento. As duas fontes mais importantes são os lodos dos decantadores (ou flotadores) e a água de lavagem dos filtros (RICHTER, 2001), conforme se observa na Figura 3.

Figura 3 - Pontos de geração de resíduos em uma ETA convencional.



Fonte: Cordeiro (1999)

Os lodos gerados nos decantadores de ETAs convencionais podem ter sua composição bastante variada, dependendo fundamentalmente das condições apresentadas pela água bruta, das dosagens e produtos químicos utilizados, da forma de limpeza dos decantadores, entre outros fatores (CORDEIRO, 1999).

A NBR 10.004 classifica os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água como resíduos sólidos, tornando inviável o seu lançamento em corpos d'água (ABNT, 2004). Assim, é necessário que esse resíduo tenha um fim apropriado, previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010).

Apesar da rígida legislação ambiental vigente no país, o lançamento de resíduos nos cursos d'água continua sendo a prática mais adotada pelas ETAs. Porém, esse lançamento somente pode ser viabilizado em casos especiais, quando a carga poluidora pode ser absorvida pelo corpo receptor (LIBÂNIO, 2010).

Ainda para Libânio (2010), uma opção para a disposição final do lodo é a utilização de lagoas de lodo. Porém, quando esgotada a capacidade de acumulação de lodo na lagoa, a torta formada deve ser disposta em outro local. Entre os métodos alternativos para a disposição final do lodo destacam-se: aplicação no solo, disposição em aterro sanitário, lançamento em estações de tratamento de esgoto, incineração e a fabricação de tijolos.

3.3 Legislação para água tratada

3.3.1 Portaria de Consolidação nº 05 do Ministério da Saúde

A Portaria de Consolidação nº 05, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde (MS), dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Desse modo, aplica-se a toda água destinada ao consumo humano proveniente de sistema ou de solução alternativa de abastecimento (BRASIL, 2017).

Brasil (2017) define como água para consumo humano a água potável que se destina à ingestão, à produção e preparação de alimentos e à higiene pessoal, independente da sua origem. Assim, deve-se atender ao padrão de potabilidade estabelecido nesta portaria, sendo definido como o conjunto de valores permitidos como parâmetro de qualidade da água para consumo humano.

Para a determinação dos parâmetros de qualidade, são utilizadas metodologias que atendam às normas nacionais e internacionais, tais como: *Standard Methods for the Examination of Water e Wastewater* (APHA), *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), normas publicadas pela *International Standardization Organization* (ISO) e metodologias propostas pela Organização Mundial da Saúde (BRASIL, 2017).

Essa portaria estabelece que os sistemas e as soluções alternativas coletivas de abastecimento de água devem contar com responsável técnico. Além disso, toda água destinada ao consumo humano, distribuída coletivamente, deverá passar por processo de desinfecção ou cloração e que as águas provenientes de manancial superficial devem ser submetidas a processo de filtração (BRASIL, 2017).

Ainda para Brasil (2017), as ações de vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano atribuídas à União são competências do MS e de entidades a ele vinculadas como: Secretaria de Vigilância em Saúde (SVS/MS), Secretaria Especial de Saúde Indígena (SESAI/MS), Fundação Nacional da Saúde (FUNASA) e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Em nível estadual e municipal, essas ações competem às Secretarias de Saúde dos Estados e às Secretarias de Saúde dos Municípios, respectivamente. Essa vigilância e controle da qualidade da água se baseia no monitoramento dessa água por meio de parâmetros analíticos e seus respectivos valores máximos permitidos (VMP), indicados no Quadro 4.

Quadro 4 - Alguns parâmetros previstos na Portaria de Consolidação nº 05 e seus respectivos valores máximos permitidos.

Parâmetros	VMP
Coliformes totais	Ausência em 100 mL
Cor aparente	15 uH
Gosto e odor	Intensidade 6
pH	6,0 a 9,5
Sólidos dissolvidos totais	1000 mg.L ⁻¹
Turbidez – padrão organoléptico	5 uT
Turbidez (após filtração lenta)	1,0 uT
Turbidez (após filtração rápida)	0,5 uT

Fonte: Adaptado de Brasil (2017)

3.3.2 Resolução CONAMA nº 357

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005b).

Conforme o artigo 3º, as águas doces, salinas e salobras são classificadas em treze classes, de acordo com a qualidade requerida para os seus usos preponderantes. Dessa forma, quanto mais exigente for o seu uso, melhor deverá ser a qualidade da água requerida (BRASIL, 2005b).

As águas doces, que apresentam salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰, são classificadas em cinco classes, sendo elas: classe especial, classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4. As águas salobras são definidas como águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰, sendo classificadas em classe especial, classe 1, classe 2, classe 3. Já as águas salobras, que possuem salinidade superior a 30 ‰, dividem-se em classe especial, classe 1, classe 2, classe 3 (BRASIL, 2005b).

As águas doces podem ser destinadas para o consumo humano, com exceção daquelas enquadradas na classe 4, que são destinadas apenas à navegação e à harmonia paisagística (BRASIL, 2005b). No entanto, cada classe de água doce requer um tratamento adequado, conforme ilustrado no Quadro 5.

Quadro 5 - Tratamento requerido em função da classificação das águas doces.

Classe	Tratamento adequado
Classe Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento simplificado
Classe 2	Tratamento convencional
Classe 3	Tratamento convencional ou avançado
Classe 4	Água destinada a usos menos exigentes

Fonte: Adaptado de Brasil (2005b)

A desinfecção consiste na remoção e inativação de organismos patogênicos presentes na água. O tratamento simplificado engloba as etapas de clarificação por meio de filtração, desinfecção e correção de pH quando necessário. Já o tratamento convencional consiste na clarificação com a utilização de coagulante e floculação, seguida de desinfecção e correção de pH. Por fim, o tratamento avançado requer técnicas de remoção e/ou inativação de constituintes refratários aos processos convencionais de tratamento (BRASIL, 2005b).

O enquadramento dos corpos d'água em cada classe é realizado a partir de um conjunto de condições e padrões de qualidade, que estabelecem valores máximos para parâmetros como: materiais flutuantes, óleos e graxas, substâncias que comuniquem gosto ou odor, corantes de fontes antrópicas, resíduos sólidos objetáveis, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) 5 dias a 20°C, oxigênio dissolvido (OD), turbidez, cor verdadeira, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos dissolvidos totais, entre outros (BRASIL, 2005b).

Ainda para Brasil (2005b), os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados nos corpos de água após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta resolução e em outras normas aplicáveis. Dessa forma, o artigo 28 prevê que os efluentes não poderão conferir ao corpo d'água receptor características em desacordo com o enquadramento estabelecido.

Das condições de lançamento de efluentes destacam-se: pH entre 5 e 9, temperatura inferior a 40°C, materiais sedimentáveis em até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone *Imhoff*, vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor,

óleos minerais em até 20 mg.L⁻¹, óleos vegetais e gorduras animais em até 50 mg.L⁻¹ e ausência de materiais flutuantes e remoção mínima de 60% de DBO (BRASIL, 2005b).

3.4 Legislação para lodo

3.4.1 Lei nº 12.305 e Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como estabelece as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Também identifica as responsabilidades dos geradores de resíduos e do poder público (BRASIL, 2010).

Esta lei aplica-se a pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos e as que desenvolvem ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve-se priorizar a seguinte ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

De acordo com o artigo 3º desta lei, a destinação final ambientalmente adequada inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético. Além disso, define como disposição final ambientalmente adequada a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, de acordo com normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde e a minimizar os impactos ambientais (BRASIL, 2010).

Para efeito desta lei, os resíduos sólidos são classificados quanto à sua origem e quanto à sua periculosidade. De acordo com sua origem, esses resíduos podem ser classificados como: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviço de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transporte e resíduos de mineração. E, de acordo com a sua periculosidade, são classificados em resíduos perigosos e resíduos não perigosos (BRASIL, 2010). Assim, o lodo é classificado como resíduo sólido dos serviços públicos de saneamento básico.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe, a qual se enquadra como a maior bacia em grau de importância econômica para o estado de Sergipe. A água utilizada nesse estudo é proveniente do rio Poxim, um dos principais afluentes do Rio Sergipe. O rio Poxim possui área de drenagem de 352,0 km² e é responsável pelo abastecimento de parte da cidade de Aracaju/SE (SEMARH, 2015).

De acordo com SEMARH (2015), ao longo de anos, a média dos parâmetros de qualidade vem sofrendo alterações significativas. O parâmetro que mais interfere na qualidade da água do corpo hídrico é a concentração de coliformes termotolerantes, que na maioria dos pontos de monitoramento apresentaram valores superiores aos limites estabelecidos para o enquadramento nas classes 1, 2 e 3. Essa problemática está associada à contribuição de despejos irregulares de esgotos sanitários pelas sedes municipais localizadas na sub-bacia, o que acarreta na degradação do corpo hídrico e estimula a eutrofização das águas nas margens do rio.

4.2 Amostragem e procedimentos

Foram realizadas cinco coletas de água bruta na ETA Poxim (Figura 4a) durante os meses de junho e julho de 2021. Situada nas coordenadas geográficas 10° 55' 16.435" S e 37° 5' 48.746" W, a estação possui vazão de captação de 2600 m³/h e utiliza o sistema de tratamento convencional. Os produtos químicos utilizados na ETA Poxim são sulfato de alumínio, agente desinfetante à base de cloro e ácido fluossilícico.

A captação da água bruta da ETA Poxim, antes realizada no próprio curso do rio Poxim, foi alterada em fevereiro de 2021 para o reservatório do Rio Poxim (Figura 4b), formado pela Barragem Jaime Umbelino de Souza, localizada no município de São Cristóvão/SE.

Situado nas coordenadas geográficas 10° 55' 1.067" S e 37° 12' 22.120" W, o reservatório do Rio Poxim tem volume de 32.730.000,00 m³ e 30 m de profundidade. Além disso, objetiva regularizar a vazão do rio e prover abastecimento de água na Região Metropolitana de Aracaju durante o período de 20 anos.

Figura 4 - Localização da ETA Poxim (a), e do reservatório do Rio Poxim (b).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2021)

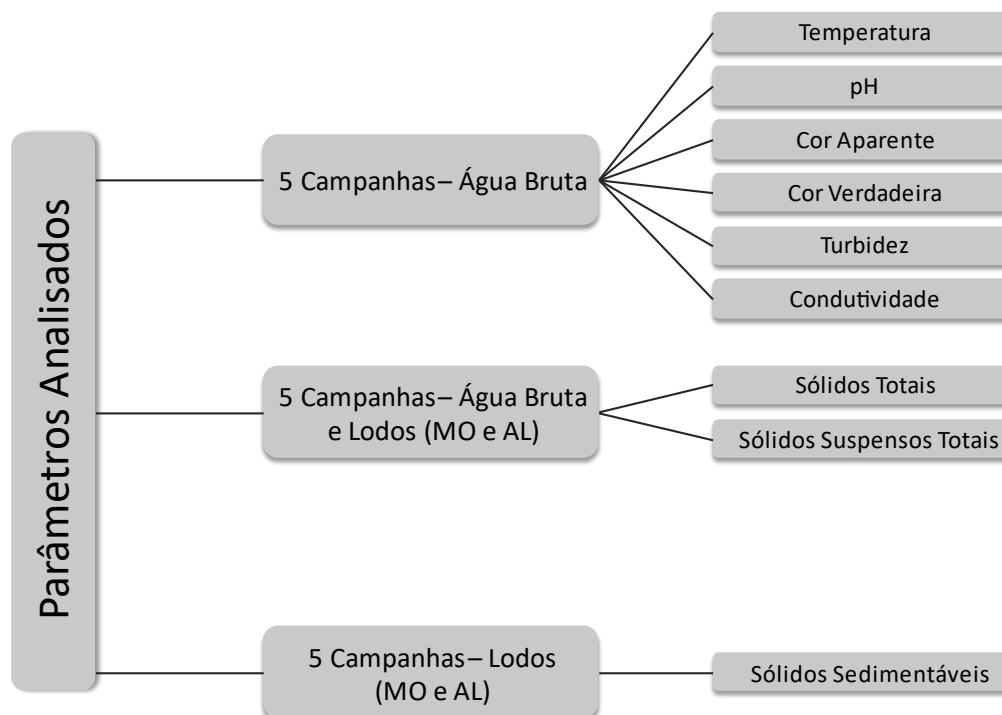
Todas as coletas foram armazenadas em garrafas de polietileno tereftalato (PET), previamente higienizadas, e acondicionadas em refrigerador do Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Para o tratamento da água bruta foram utilizados dois coagulantes: um coagulante químico, à base de sulfato de alumínio; e um natural, proveniente da semente de *Moringa oleifera*. A dosagem do sulfato de alumínio foi adotada com base no trabalho de Santos *et al.* (2018) para a água bruta em estudo, com concentração de 30 mL/L; enquanto a dosagem do coagulante proveniente da semente de moringa foi adotada de acordo com a proposta de Amado (2017) e Michelan, Amado e Santos (2018) para o rio Poxim, que correspondeu à 17,5 mL/L.

Os experimentos foram compostos por preparação da solução e dosagem dos coagulantes, ensaio de tratabilidade da água, caracterização da água bruta, quantificação dos sólidos totais e suspensos totais presentes na água bruta e no lodo gerado durante o tratamento da água e determinação dos sólidos sedimentáveis presentes no lodo proveniente da utilização de sulfato de alumínio e de *Moringa oleifera*.

O fluxograma apresentado na Figura 5 indica todos os parâmetros analisados para a água bruta e para os lodos em estudo, bem como a quantidade de campanhas em que esses foram aferidos.

Figura 5 - Fluxograma das campanhas e parâmetros analisados.



Fonte: Autora (2021)

Assim, conforme observado na Figura 5, para a caracterização da água bruta foram analisados parâmetros físico-químicos, tais como: temperatura, pH, cor aparente, cor verdadeira, turbidez e condutividade. Para as cinco campanhas de água bruta e do lodo proveniente do tratamento de água com o uso de *Moringa oleifera* (MO) e de sulfato de alumínio (AL) foram quantificados os sólidos totais e os sólidos suspensos totais. Já os sólidos sedimentáveis foram determinados para as cinco campanhas da água bruta com o coagulante proveniente da semente de moringa e com sulfato de alumínio.

4.3 Análise dos parâmetros físico-químicos da água bruta

Os parâmetros físico-químicos analisados para a água bruta foram determinados com base em APHA (2017). A referência metodológica para a determinação da cor aparente e cor verdadeira foi a 2120 para comprimento de onda de $\lambda = 455 \text{ nm}$, enquanto que para o pH foi utilizada a 4500-H. Para a turbidez utilizou a referência metodológica 2130 e, para a condutividade, o método 2510. Já a temperatura foi aferida com o auxílio de um termômetro digital.

4.4 Preparação dos coagulantes

4.4.1 Coagulante químico

O coagulante químico utilizado foi o sulfato de alumínio, cuja fórmula molecular é $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Neste estudo utilizou-se o sulfato de alumínio da marca Suall Piscinas, com pureza de 98%.

No preparo do coagulante inorgânico utilizou-se 15 g de sulfato de alumínio diluído em 100 mL de água destilada, resultando em solução com concentração de 15%.

4.4.2 Coagulante natural

As vagens de *Moringa oleifera* foram obtidas através de retirada em árvore localizada na Universidade Federal de Sergipe (Figura 6) e processadas no Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA), localizado no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Figura 6 - *Moringa oleifera* da qual foram retiradas as vagens.



Fonte: Autora (2021)

Após a coleta das vagens, as sementes foram separadas das vagens e, ainda com casca, foram secas naturalmente durante 4 dias. As Figuras 7 e 8 mostram as vagens e as sementes com cascas após a secagem, respectivamente.

Figura 7 - Vagens fechadas (a); vagens abertas (b).



Fonte: Autora (2021)

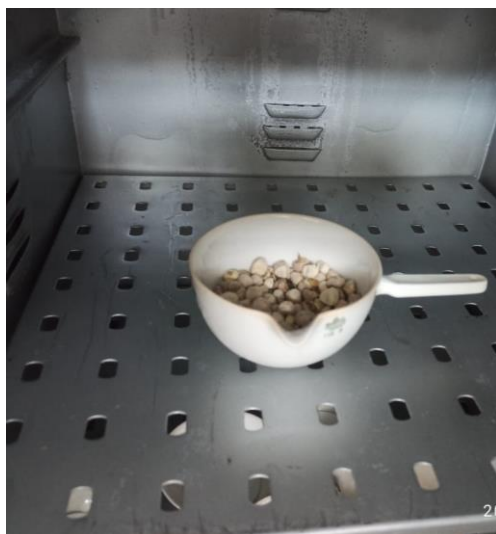
Figura 8 - Sementes com casca após a secagem.



Fonte: Autora (2021)

Para a preparação da solução de *Moringa oleifera* seguiu-se a metodologia de Arantes *et al.* (2014). Inicialmente, foram retiradas as cascas das sementes, seguida de secagem das mesmas em estufa (Figura 9a) por 24 horas à temperatura de 65°C. Transcorrido esse tempo, foram encaminhadas para o dessecador (Figura 9b) até atingir a temperatura natural, de forma gradativa.

Figura 9 - Secagem das sementes em estufa (a); resfriamento das sementes em dessecador (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2021)

Em seguida, as sementes foram maceradas em pilão (Figura 10a) até obter granulometria suficiente para passar pela peneira nº 20 (0,8 mm) (Figuras 10b e 10c, respectivamente). A fim de atingir solução com concentração de 2%, adicionou-se 20 gramas do pó da semente em um litro água destilada. Posteriormente, a solução foi homogeneizada por 2 minutos em liquidificador (Figura 11a) e foi passada na peneira nº 100 (0,149 mm), como ilustrado na Figura 11b. Por fim, a solução resultante foi armazenada em um recipiente de vidro (Figura 12) para ser acondicionada na geladeira à temperatura de -4°C .

Figura 10 - Sementes sendo maceradas em pilão (a); pó resultante da maceração passando na peneira nº 20 (b); pó resultante da maceração e peneiração (c).



(a)



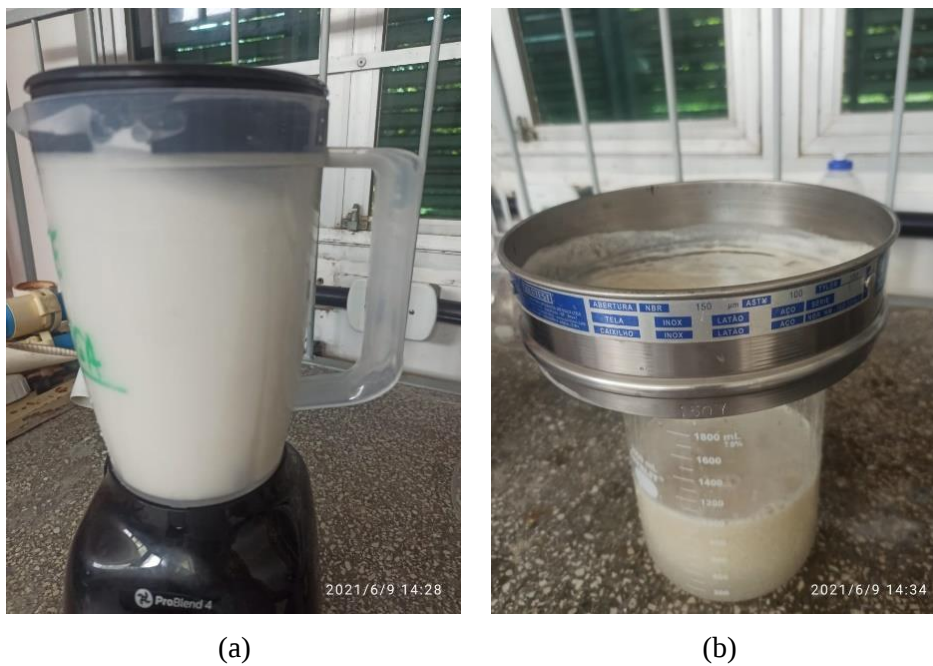
(b)



(c)

Fonte: Autora (2021)

Figura 11 - Agitação da solução no liquidificador (a); peneiração da solução homogeneizada na peneira nº 100 (b).



Fonte: Autora (2021)

Figura 12 - Solução armazenada no recipiente de vidro.



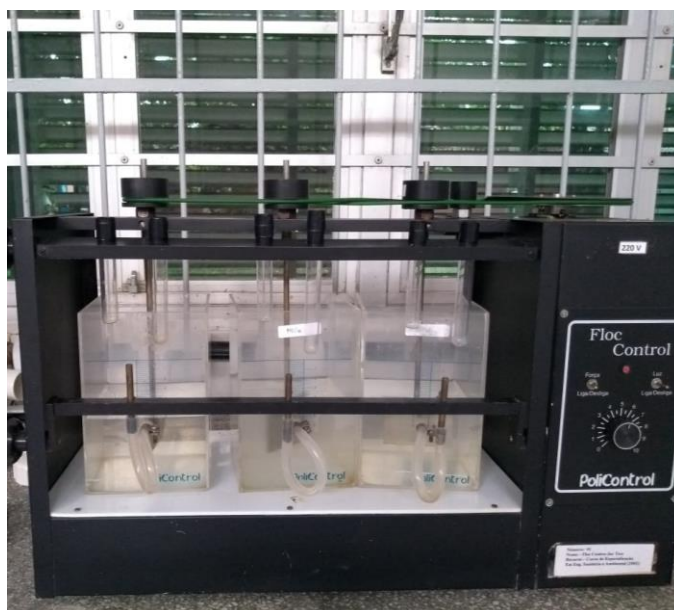
Fonte: Autora (2021)

4.5 Ensaio de tratabilidade

O ensaio de tratabilidade da água bruta de cada coleta foi realizado com o auxílio do *Jar Test* (Figura 13). Esse equipamento simula, à nível de bancada, as etapas de mistura rápida com coagulação, mistura lenta (floculação) e decantação. Foram utilizados três jarros com suporte de até dois litros, porém optou-se por utilizar o volume de 1,2 litros de água bruta em cada jarro. No primeiro deles nenhum coagulante foi adicionado, contendo apenas água bruta; no segundo jarro foi adicionado o coagulante natural; e por fim, no terceiro jarro adicionou-se o coagulante químico.

Os coagulantes foram inseridos simultaneamente no conteúdo de cada jarro e iniciou-se a etapa de mistura rápida, com rotação das palhetas de 450 rpm durante um minuto. Em seguida, a velocidade foi reduzida para 40 rpm durante 20 minutos, simulando a etapa de mistura lenta (floculação). Por fim, o equipamento foi desligado, dando início a etapa de decantação com duração de 30 minutos.

Figura 13 - *Jar Test*.



Fonte: Autora (2021)

Após a decantação, a água excedente em cada jarro foi retirada com o auxílio de uma mangueira que consegue verter o volume de água acima do ponto onde está situada, de forma a não revolver o lodo. Posteriormente, o lodo foi retirado com o auxílio de conta-gotas e transferido para garrafas PET, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Amostras do lodo resultante do tratamento da água com moringa (a) e com sulfato de alumínio (b) para cada coleta.



Fonte: Autora (2021)

Também foram retiradas amostras ensaiadas da água bruta de cada coleta, as quais foram armazenadas em garrafas PET previamente higienizadas, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Amostras das cinco coletas de água bruta após ensaio no *Jar Test*.



Fonte: Autora (2021)

4.6 Determinação dos sólidos

De acordo com APHA (2017), as análises de sólidos são importantes no controle dos processos de tratamento biológico e físico de águas residuais, bem como na avaliação de conformidade com as limitações estabelecidas pela agência reguladora.

A água bruta e o lodo produzido durante o tratamento da água com moringa e com sulfato de alumínio foram caracterizados quanto aos parâmetros sólidos e suas metodologias. Neste estudo foram determinados os sólidos totais, os sólidos suspensos totais e os sólidos sedimentáveis para cada lodo; e os sólidos totais e suspensos totais para a água bruta.

Os sólidos totais correspondem ao resíduo de material que permanece no recipiente após a evaporação de uma amostra e sua secagem em forno à temperatura definida. São divididos em sólidos suspensos totais, que correspondem à parcela de sólidos que ficam retidos em um filtro; e sólidos totais dissolvidos, correspondente à parcela que passa através do filtro de tamanho nominal de poro igual ou inferior a 2,0 µm. Além destes, existem os sólidos sedimentáveis, que correspondem à porção do material em suspensão que sedimenta dentro de um período de tempo definido (APHA, 2017).

Para a determinação dos sólidos totais e dos sólidos suspensos totais utilizou-se a metodologia proposta pela APHA (2017) e para os sólidos sedimentáveis, seguiu-se a Norma Técnica Interna SABESP NTS 013 (SABESP, 1999).

4.6.1 Sólidos totais

Para a determinação dos sólidos totais, as cápsulas de porcelana utilizadas foram secas em estufa a 103-105°C durante 24 horas. Em seguida, foram resfriadas no dessecador, onde permaneceram até a sua utilização. Logo após, com o auxílio de uma balança de precisão, foi medida a massa de cada cápsula de porcelana.

Com o auxílio de proveta e conta-gotas (para mensurar com melhor precisão), foram retiradas amostras de 50 mL das 5 campanhas da água bruta e do lodo gerado durante o tratamento da água com *Moringa oleifera* e com sulfato de alumínio, sendo estas análises realizadas em duplicatas. Em seguida, as amostras foram inseridas nas cápsulas de porcelana previamente preparadas. Logo após, as cápsulas com cada amostra foram levadas para estufa a 103-105°C durante 24 horas, sendo posteriormente encaminhadas para o dessecador até seu resfriamento. Por fim, mediu-se a massa de cada cápsula com a amostra após secagem.

Logo, a concentração de sólidos totais em cada amostra foi determinada através da Equação 1.

$$ST = \frac{(M_2 - M_1)}{V_1} \quad (1)$$

onde:

ST – Concentração de sólidos totais, em mg.L⁻¹;

M_1 – Massa da cápsula de porcelana após secagem em estufa a 103-105°C por 24 horas e posterior resfriamento em dessecador, em mg;

M_2 – Massa da cápsula de porcelana com a amostra após secagem em estufa a 103-105°C por 24 horas e posterior resfriamento em dessecador, em mg;

V_1 – Volume da amostra, em L.

4.6.2 Sólidos suspensos totais

Inicialmente, foram preparadas as membranas que atuaram como filtro no processo de separação dos sólidos suspensos. Para isto, cada membrana foi inserida no sistema de filtração, onde foram realizadas 3 lavagens à vácuo utilizando 20 mL de água destilada para cada lavagem. Posteriormente, cada membrana foi transferida para uma cápsula de porcelana e encaminhada para estufa a 103-105°C durante 24 horas, sendo este o tempo necessário para atingir massa constante. Em seguida, as cápsulas de porcelana contendo a membrana foram resfriadas em dessecador, onde foram mantidas até a sua utilização. Logo após, foi medida a massa de cada cápsula com a membrana.

Utilizando proveta e conta-gotas, foi retirada uma amostra de 50 mL das 5 campanhas da água bruta e do lodo gerado durante o tratamento da água com *Moringa oleifera* e com sulfato de alumínio, sendo estas análises realizadas em duplicata. Em seguida, cada amostra foi filtrada na membrana condicionada, com o auxílio de bomba à vácuo. Cada membrana com o filtrado foi transferida para uma cápsula de porcelana e levada para estufa a 103-105°C durante 24 horas. Posteriormente, foi medida a massa de cada cápsula contendo a membrana com o filtrado.

Assim, para determinar a concentração de sólidos suspensos totais em cada amostra foi utilizada a Equação 2.

$$SST = \frac{(M_5 - M_4)}{V_2} \quad (2)$$

onde:

SST – Concentração de sólidos suspensos totais, em mg.L⁻¹;

M_4 – Massa da cápsula de porcelana com a membrana após secagem em estufa a 103-105°C por 24 horas e posterior resfriamento em dessecador, em mg;

M_5 – Massa da cápsula de porcelana e membrana com o filtrado após secagem em estufa a 103-105°C por 24 horas e posterior resfriamento em dessecador, em mg;

V_2 – Volume da amostra, em L.

4.6.3 Sólidos sedimentáveis

Para cada uma das 5 campanhas foi retirada uma amostra de 1 litro da água bruta para ser ensaiada com cada coagulante. Posteriormente, cada amostra foi transferida para o cone *Imhoff*, onde foi homogeneizada com o auxílio de uma baqueta e decantada durante 45 minutos. Terminado este tempo, girou-se o cone em um movimento de rotação de 360°, a fim de promover leve movimentação na massa líquida de forma a favorecer a sedimentação dos sólidos. Logo após, a amostra permaneceu em repouso por mais 15 minutos, totalizando uma hora. O resultado foi expressado diretamente na leitura do sedimentado através da escala graduada do cone *Imhoff*, em mL/L, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Cone *Imhoff* com as amostras da água bruta com o coagulante natural (à esquerda) e com o coagulante químico (à direita).



Fonte: Autora (2021)

4.7 Estudo estatístico

A princípio, foi realizada a estatística descritiva para os parâmetros de análise da água bruta, sendo avaliadas medidas de dispersão (desvio padrão) e de tendência central (média aritmética e mediana). Além disso, as duplicatas realizadas para a quantificação dos sólidos totais e suspensos totais foram compactadas em média e desvio padrão.

A fim de relacionar e prever o comportamento das variáveis, foram realizados tratamentos estatísticos com nível de confiança de 95%, utilizando o software IBM SPSS *Statistics*. Dessa forma, para avaliar a normalidade dos dados foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, enquanto o pressuposto de homogeneidade da variância foi avaliado por meio do teste de Levene.

A partir da análise dos resultados do teste de Shapiro-Wilk foi definido qual teste estatístico utilizar, de modo a verificar se existem diferenças significativas entre os dados do lodo produzido pelo uso de *Moringa oleifera* e os dados do lodo gerado utilizando sulfato de alumínio. Portanto, a fim de comparar os grupos em que ambos apresentavam uma possível distribuição normal foi utilizado um teste paramétrico - o Teste T ou T de Student. Porém, considerando a heterogeneidade da variância, foi solicitada a correção de Welch e posterior aplicação do Teste T. Entretanto, para os grupos que não atendiam os pressupostos do Test T para duas amostras independentes, foi aplicado um teste não paramétrico correspondente - o Teste de Mann-Whitney.

Ademais, foram elaborados gráficos do tipo *boxplot* para os resultados da água bruta e dos lodos, permitindo melhor visualização da distribuição e dos valores discrepantes dos dados (outliers).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da água bruta

Os resultados referentes aos parâmetros físico-químicos analisados para as cinco coletas de água bruta estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados para a água bruta.

Dados	Temperatura (°C)	Cor Aparente (uH)	Cor Verdadeira (uH)	Turbidez (uT)	Condutividade (mS/cm)	pH
Coleta 1	26,0	68,0	36,0	5,0	434,0	6,2
Coleta 2	25,8	49,0	35,0	2,0	666,0	6,6
Coleta 3	25,6	77,0	28,0	5,0	420,0	7,3
Coleta 4	24,7	80,0	43,0	5,0	930,0	7,4
Coleta 5	26,1	62,0	40,0	5,0	436,0	7,4
Média	25,6	67,2	36,4	4,4	577,2	7,0
Mediana	25,8	68,0	36,0	5,0	436,0	7,3
D. Padrão	0,6	12,4	5,7	1,3	222,2	0,5
Mínimo	24,7	49,0	28,0	2,0	420,0	6,2
Máximo	26,1	80,0	43,0	5,0	930,0	7,4
Teste de Normalidade (p-valor)	0,172	0,725	0,854	< 0,001	0,067	0,102

Fonte: Autora (2021)

Observou-se que todas as coletas apresentaram valor de turbidez menor que 100 uT, cor verdadeira inferior a 75 uH e pH entre 6 e 9,0, atendendo aos valores máximos previstos pela Resolução CONAMA nº 357 para água doce.

A temperatura apresentou pouca variação, situando-se na faixa de 24,7 a 26,1°C. Esse é um ponto favorável, pois, de acordo com von Sperling (2005), a elevação de temperatura aumenta a taxa das reações químicas e biológicas, além de reduzir a solubilidade dos gases na água, diminuindo a concentração de oxigênio dissolvido.

A cor aparente, assim como a turbidez, é caracterizada pela presença de sólidos suspensos. Já a cor verdadeira é determinada após remoção das partículas suspensas através de centrifugação ou filtração da amostra, ou seja, caracteriza-se apenas pela presença de sólidos dissolvidos.

O resultado mais significativo de cor aparente ocorreu na coleta 4, sendo este igual a 80 uH. Destaca-se que o presente estudo foi desenvolvido durante o período chuvoso na capital

sergipana, o qual compreende os meses de abril a agosto. Portanto, esse aumento na cor aparente pode estar associado ao carregamento de sólidos pela água da chuva.

A cor verdadeira variou de 28 a 43 uH e, de acordo com Libânio (2010), as águas naturais geralmente apresentam cor verdadeira na faixa de 0 a 200 uH, porém valores inferiores a 10 uH são praticamente imperceptíveis.

Segundo Libânio (2010), as águas superficiais apresentam turbidez na faixa de 3 a 500 uT. Entretanto, em lagos e represas a turbidez tende a apresentar valores inferiores a 10 uT, uma vez que baixas velocidades de escoamento da água proporcionam a sedimentação de parte dos sólidos em suspensão. Isso explica os baixos resultados obtidos para o parâmetro turbidez, uma vez que a água bruta em estudo é proveniente do reservatório do Rio Poxim.

Conforme Brasil (2014), as águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Entretanto, valores acima de 100 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ indicam contaminação por efluentes domésticos ou industriais, podendo chegar a 1.000 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Assim, tendo em vista os resultados obtidos para a condutividade, verifica-se que, possivelmente, a água bruta em estudo recebe despejos irregulares.

Para o pH observou-se baixa variação do parâmetro (6,2 a 7,4), bem como sua proximidade com a neutralidade. E, de acordo com Pádua e Ferreira (2006), as águas naturais tendem a apresentar valores de pH próximo da neutralidade devido à sua capacidade de tamponamento.

Com relação ao teste estatístico de normalidade, baseado no teste de Shapiro-Wilk, observou-se que a turbidez foi o único parâmetro analisado para a água bruta que não apresentou distribuição normal.

5.2 Sólidos totais e suspensos totais presentes na água bruta

Os resultados dos sólidos totais e suspensos totais para as cinco campanhas de água bruta estão apresentados na Tabela 2. No entanto, com exceção da coleta 5, as demais expressaram valores negativos para os sólidos suspensos totais, indicando erros na análise. Sendo assim, estes resultados foram desconsiderados, o que impossibilitou a análise estatística dos dados referentes a este parâmetro.

Tabela 2 - Resultados dos sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST), em mg.L^{-1} , presentes na água bruta.

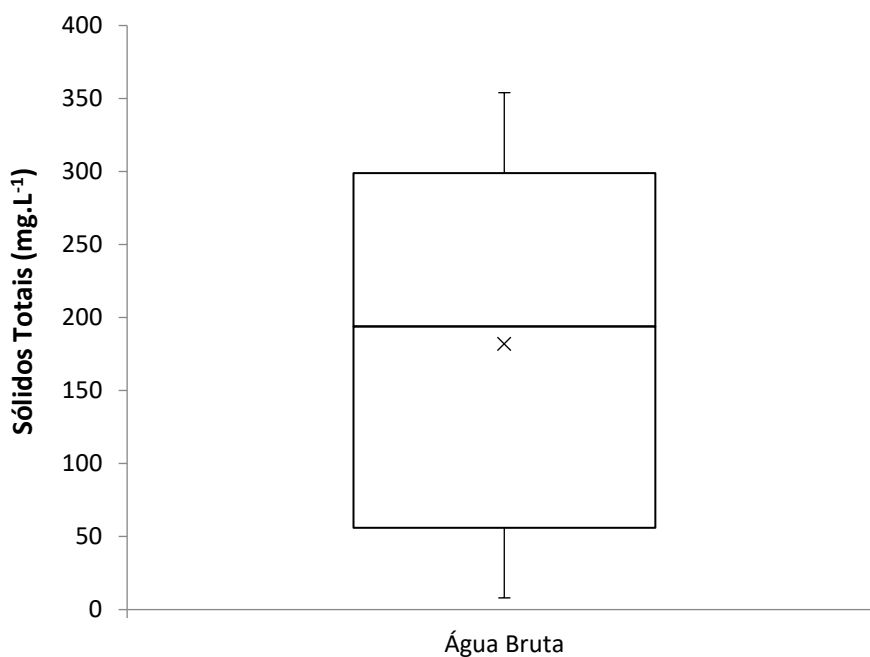
Dados	ST	SST
Coleta 1	$74,00 \pm 10,00$	-
Coleta 2	48,00	-
Coleta 3	$322,00 \pm 32,00$	-
Coleta 4	$298,00 \pm 10,00$	-
Coleta 5	$101,00 \pm 93,00$	112,00
Média	182,00	-
Desvio Padrão	132,41	-
Teste de Normalidade (p-valor)	0,174	-

Fonte: Autora (2021)

Com base nos resultados apontados na Tabela 2, nota-se que as concentrações de sólidos totais para a água bruta apresentaram significativa dispersão, com desvio padrão de cerca de 73% do valor médio. Em relação ao teste estatístico de normalidade, verificou-se que tais dados seguem uma distribuição normal.

De acordo com o gráfico tipo *boxplot*, apresentado na Figura 17, os dados referentes às concentrações de sólidos totais para a água bruta apresentaram distância interquartil de 243,0 mg.L^{-1} , ou seja, 50% dos resultados encontram-se dentro desse intervalo.

Figura 17 - *Boxplot* dos sólidos totais, em mg.L^{-1} , presentes na água bruta.



Fonte: Autora (2021)

5.3 Sólidos totais, suspensos totais e sedimentáveis presentes nos lodos

Os resultados da concentração de sólidos totais para o lodo proveniente da utilização de *Moringa oleifera* e de sulfato de alumínio estão apresentados na Tabela 3. Nota-se que para o lodo do sulfato de alumínio houve muita dispersão dos dados, apresentando um desvio padrão com cerca de 68% do valor médio. Em média, para a concentração de sólidos totais no lodo da moringa, verificou-se um percentual de redução de, aproximadamente, 72% em relação ao lodo com sulfato de alumínio.

Tabela 3 - Resultados dos sólidos totais, em mg.L⁻¹, presentes no lodo da moringa e do sulfato de alumínio.

Dados	Moringa	S. de Alumínio
Coleta 1	646,00 ± 78,00	1156,00 ± 42,00
Coleta 2	474,00 ± 102,00	587,00 ± 9,00
Coleta 3	631,00 ± 17,00	3937,00 ± 141,00
Coleta 4	1208,00 ± 258,00	1988,00 ± 24,00
Coleta 5	510,00 ± 56,00	4709,00 ± 193,00
Média	693,80	2475,40
Desvio Padrão	312,41	1681,88
Teste de Normalidade (p-valor)	0,013	0,122
Teste Estatístico (p-valor)	0,003	

Fonte: Autora (2021)

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk, a série de dados dos sólidos totais presentes no lodo com *Moringa oleifera* não apresentou uma distribuição normal. Portanto, como os pressupostos do Teste T não foram atendidos, foi aplicado o teste de Mann-Whitney, demonstrando que existem diferenças estatisticamente significativas entre as concentrações de sólidos totais no lodo produzido com o uso de moringa e no lodo com o uso de sulfato de alumínio.

Observa-se que os resultados dos sólidos totais foram mais significativos para o lodo com sulfato de alumínio. Essa discrepância em relação ao lodo com moringa pode estar associada à dosagem do coagulante químico para a água bruta em estudo, uma vez que essa foi superior à dosagem do coagulante natural. Destaca-se que resíduos com altas cargas de sólidos totais, quando lançados em corpos receptores sem tratamento prévio, representam risco potencial para todo o ecossistema, além de afetar a qualidade da água.

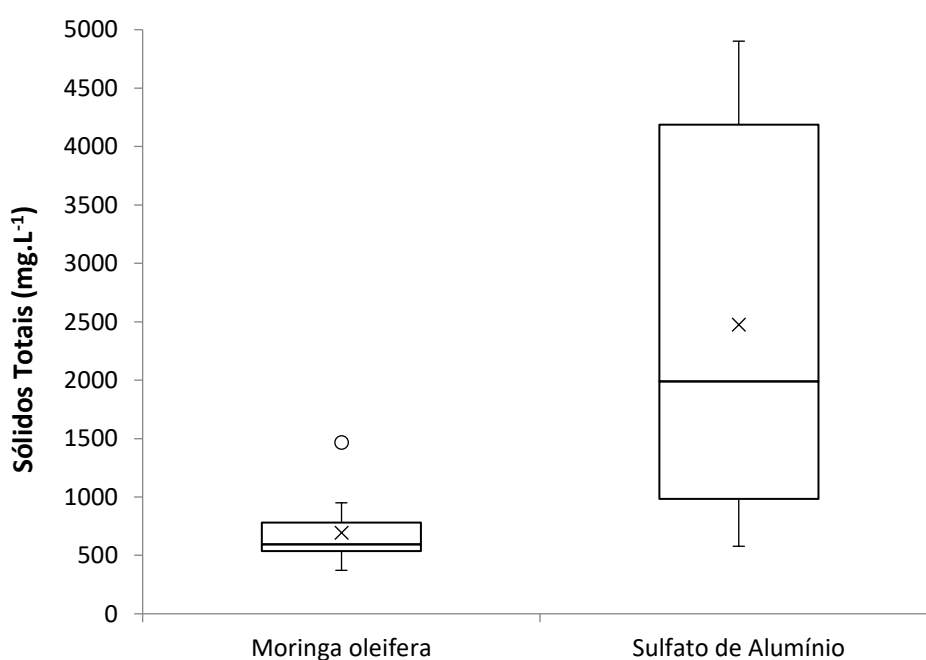
Na análise do lodo da ETA Poxim, a qual utiliza sulfato de alumínio como coagulante, Jesus (2021) obteve para os sólidos totais uma média de 26.450,0 mg.L⁻¹. No entanto, no presente estudo, a média dos sólidos totais para o lodo com sulfato de alumínio foi de 2.475,4

mg.L⁻¹. Ressalta-se que o estudo realizado por Jesus (2021) foi desenvolvido com a mesma água de estudo (ETA Poxim), porém com captação no curso do rio Poxim que, além da adição de coagulante químico, necessitava de polímeros, carvão ativado e cal, ainda no início do tratamento. Portanto, essa diferença na quantidade de sólidos totais reflete na adição de diversos produtos químicos durante a potabilização da água na ETA Poxim, bem como na melhora da qualidade da água bruta, uma vez que o ponto de captação foi alterado para o reservatório do Rio Poxim.

Segundo Richter (2001), o teor de sólidos totais presentes no lodo de ETA com sulfato de alumínio situa-se entre 1.000 a 40.000 mg.L⁻¹. Além disso, a aparência do lodo de sulfato de alumínio varia de acordo com a concentração de sólidos, sendo que para concentrações de até 5.000 mg.L⁻¹ o lodo tem aparência líquida. Nesse estudo, a concentração de sólidos totais no lodo de sulfato de alumínio variou de 578 a 4.902 mg.L⁻¹.

A Figura 18 apresenta o gráfico tipo *boxplot* dos resultados da concentração de sólidos totais nos lodos com os diferentes coagulantes. Pode-se observar que os dados do lodo da moringa apresentam um *outlier*, correspondente à coleta 4, com valor igual a 1466,0 mg.L⁻¹. Nota-se, também, maior distância interquartil para os dados do lodo com sulfato de alumínio em relação ao lodo da moringa, a saber, 3203,0 mg.L⁻¹ e 242,5 mg.L⁻¹, respectivamente.

Figura 18 - *Boxplot* dos sólidos totais, em mg.L⁻¹, presentes no lodo da moringa e do sulfato de alumínio.



Fonte: Autora (2021)

Através da Figura 18 também pode-se observar a diferença significativa entre as medianas, ratificando visualmente o resultado do teste de Mann-Whitney. A mediana da concentração de sólidos totais para o lodo com sulfato de alumínio foi superior à do lodo com moringa, sendo 595 mg.L^{-1} para esta e 1988 mg.L^{-1} para aquela.

Os resultados dos sólidos suspensos totais para as cinco campanhas de lodo estão expressados na Tabela 4. Entretanto, as duplicatas da coleta 2 do lodo com sulfato de alumínio resultaram em valores negativos, indicando erros na análise. Consequentemente, tais resultados foram desconsiderados, de forma a não influenciar nas análises estatísticas dos dados.

Tabela 4 - Resultados dos sólidos suspensos totais, em mg.L^{-1} , presentes nos lodo da moringa e do sulfato de alumínio.

Dados	Moringa	S. de Alumínio
Coleta 1	$367,00 \pm 41,00$	88,00
Coleta 2	$580,00 \pm 8,00$	-
Coleta 3	$615,15 \pm 127,35$	$161,00 \pm 1,00$
Coleta 4	$754,00 \pm 94,00$	$187,00 \pm 11,00$
Coleta 5	$307,26 \pm 2,50$	$189,00 \pm 7,00$
Média	524,68	166,00
Desvio Padrão	190,19	37,45
Teste de Normalidade (p-valor)	0,477	0,045
Teste Estatístico (p-valor)	0,0001	

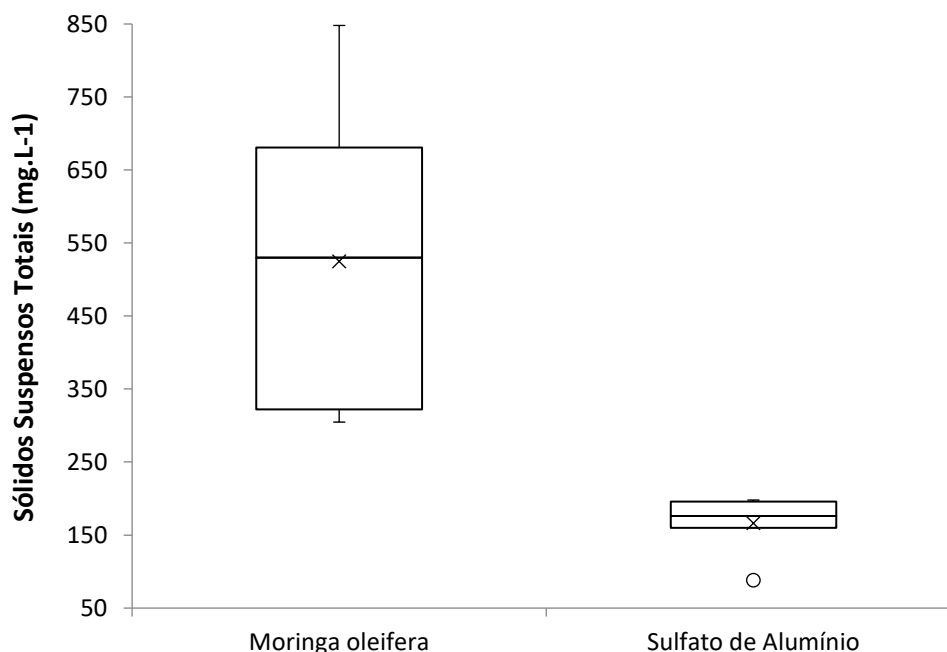
Fonte: Autora (2021)

Com a aplicação do teste de normalidade foi possível observar que a série de dados dos sólidos suspensos totais do lodo com sulfato de alumínio não apresentou uma distribuição normal. O teste estatístico demonstrou que existem diferenças significativas entre a concentração de sólidos suspensos totais no lodo da moringa e no lodo proveniente do tratamento com sulfato de alumínio.

Na coleta 2 do lodo com moringa, observou-se que os sólidos suspensos totais excederam os sólidos totais, possivelmente devido à heterogeneidade da amostra, visto que dentro do mesmo volume pode haver diferentes concentrações de sólidos.

De acordo com o *boxplot* ilustrado na Figura 19, observa-se que os dados dos sólidos suspensos totais do lodo com sulfato de alumínio apresentam um *outlier* referente à coleta 1, sendo este igual a 88 mg.L^{-1} .

Figura 19 - *Boxplot* dos sólidos suspensos totais, em mg.L^{-1} , presentes nos lodo da moringa e do sulfato de alumínio.



Fonte: Autora (2021)

Através da Figura 19 é observada menor distância interquartil para a concentração de sólidos suspensos totais do lodo com sulfato de alumínio em relação ao lodo da moringa, sendo $358,7 \text{ mg.L}^{-1}$ para este e $36,0 \text{ mg.L}^{-1}$ para aquele. Nota-se, também, que os valores das concentrações de sólidos suspensos totais no lodo da moringa superam o limite superior do lodo com sulfato de alumínio, ou seja, ultrapassam todos os resultados.

Ressalta-se que *Moringa oleifera* é uma oleaginosa rica em substâncias orgânicas, tais como óleo, proteína, gordura, vitaminas, entre outras. Dessa forma, quando utilizada como coagulante, tende a inserir carga orgânica ao lodo gerado durante o tratamento, a qual representa parcela dos sólidos suspensos totais (MICHELAN *et al.*, 2021; BERGAMASCO *et al.*, 2018). Portanto, esse acréscimo de material orgânico justifica a concentração de sólidos suspensos totais ser maior para o lodo com moringa, visto que não é observado no lodo proveniente do tratamento com sulfato de alumínio.

Os resultados do ensaio em cone *Imhoff* para as 5 coletas de lodos estão dispostos na Tabela 5. Observa-se que os dados de sólidos sedimentáveis para o sulfato de alumínio não seguem uma distribuição normal. Além disso, o teste estatístico indicou que não existem diferenças significativas entre a concentração de sólidos sedimentáveis no lodo da moringa e no lodo do sulfato de alumínio, sendo estatisticamente iguais.

Tabela 5 - Resultados dos sólidos sedimentáveis, em mL/L, presentes no lodo da moringa e do sulfato de alumínio.

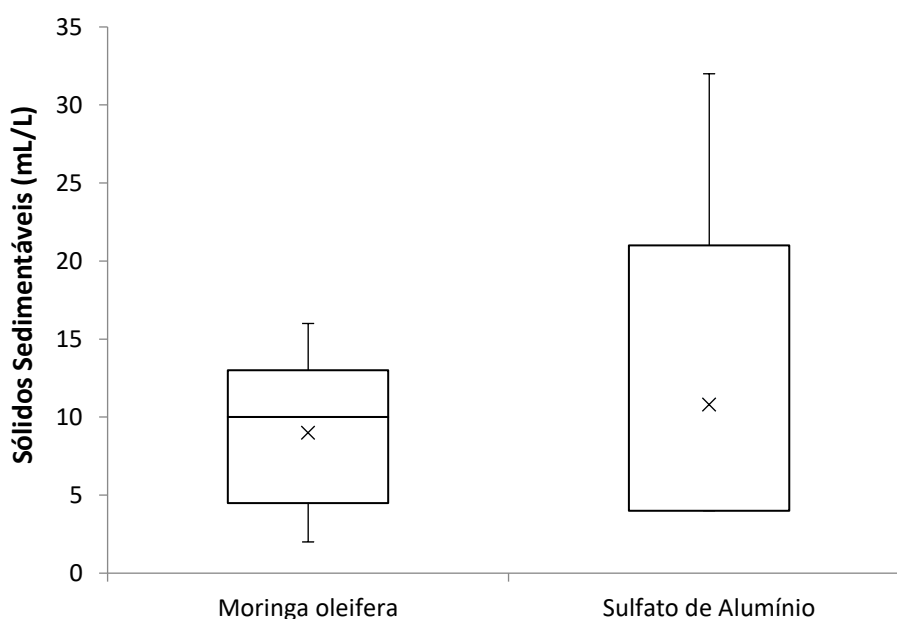
Dados	Moringa	S. de Alumínio
Coleta 1	7,0	32,0
Coleta 2	2,0	10,0
Coleta 3	10,0	4,0
Coleta 4	16,0	4,0
Coleta 5	10,0	4,0
Média	9,0	10,8
Desvio Padrão	5,1	12,1
Teste de Normalidade (p-valor)	0,856	0,006
Teste Estatístico (p-valor)	0,841	

Fonte: Autora (2021)

A média dos sólidos sedimentáveis para o lodo da moringa e do sulfato de alumínio foi de 9,0 e 10,8 mL/L, respectivamente. Portanto, tais resíduos não podem ser lançados diretamente em corpos receptores, pois seus teores de materiais sedimentáveis são superiores ao máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005b), que corresponde a 1 mL/L em teste de 1 hora em cone *Imhoff*.

Com base no gráfico tipo *boxplot* apresentado na Figura 20, observa-se que, para os dados dos sólidos sedimentáveis do lodo com sulfato de alumínio, o limite inferior e o primeiro quartil coincidem com a mediana devido à repetição dos valores.

Figura 20 - *Boxplot* dos sólidos sedimentáveis, em mL/L, presentes nos lodos da moringa e do sulfato de alumínio.



Fonte: Autora (2021)

Através da Figura 20 também é observada menor distância interquartil para a concentração de sólidos sedimentáveis no lodo da moringa em relação ao do sulfato de alumínio. Este, por sua vez, apresentou maior dispersão para valores mais elevados, porém sua mediana assume valor inferior à do lodo com moringa, sendo 10,0 mL/L para este e 4,0 mL/L para aquele.

6 CONCLUSÃO

Com base no estudo, concluiu-se que:

Todas as coletas de água bruta apresentaram valor de turbidez menor que 100 uT, cor verdadeira inferior a 75 uH e pH entre 6 e 9,0, atendendo aos valores aceitáveis para o seu enquadramento como água doce, conforme a Resolução CONAMA nº 357.

As concentrações de sólidos totais para a água bruta apresentaram significativa dispersão, com desvio padrão de cerca de 73% do valor médio, o qual corresponde a 182,00 mg.L⁻¹. Ademais, não foi possível quantificar os sólidos suspensos totais para a água bruta, devido a possíveis erros nas análises.

O estudo demonstrou que existem diferenças estatisticamente significativas entre as concentrações de sólidos totais no lodo produzido com o uso de sulfato de alumínio e no lodo gerado com a utilização de sementes de *Moringa oleifera* como coagulante. Verificou-se que o lodo com o coagulante natural gerou menor concentração de sólidos totais em relação ao lodo com o coagulante químico, apresentando, em média, um percentual de redução de aproximadamente 72% em comparação a este.

Também foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as concentrações de sólidos suspensos totais nos lodos com os diferentes coagulantes. Neste caso, para todas as coletas, o lodo com moringa apresentou maior teor de sólidos suspensos totais em comparação ao lodo com sulfato de alumínio, visto que a *Moringa oleifera*, quando utilizada como coagulante, tende a inserir carga orgânica ao lodo gerado durante o tratamento.

No que tange à concentração de sólidos sedimentáveis, o estudo demonstrou que não existem diferenças significativas para esse parâmetro entre o lodo da moringa e o lodo do sulfato de alumínio, sendo estatisticamente iguais.

Além de apresentar menor concentração de sólidos totais em relação ao lodo com sulfato de alumínio, o lodo gerado pelo uso de *Moringa oleifera* é biodegradável e não-tóxico. Sendo assim, não oferece riscos ambientais, o que é altamente vantajoso para as empresas responsáveis pela disposição final desse resíduo.

Portanto, quanto à geração de lodo, o coagulante obtido através da semente de *Moringa oleifera* mostra-se como alternativa viável para a substituição ou redução do uso de coagulante químico à base de sulfato de alumínio.

REFERÊNCIAS

- AMADO, F. R. O. **Aplicação do coagulante natural de semente de Moringa Oleifera para o tratamento de água proveniente do Rio Poxim**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bracharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão. 2017.
- ANWAR, F.; LAFIT, S.; ASHRAF, M.; GILANI, A. H. Moringa oleifera: A food plant with multiple medicinal uses. **Phytotherapy Research**, v. 21, n. 1, p. 17-25, 2007. DOI: 10.1002/ptr.2023
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington: [s.n.], 2017.
- ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S.; TATEOKA, M. S. S. Uso de coagulantes naturais a base de Moringa oleífera e tanino como auxiliares da filtração em geotextil sintético não tecido. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 780-788, julho/agosto 2014. DOI: 10.1590/S0100-69162014000400017
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- BERGAMASCO, R.; VIEIRA, A. M. S.; NISHI, L.; FALAVIGNA, A. L.; PATERNIANI, J. E. S.; KLEIN, M. R. F.; ARAÚJO, A. A.; SILVA, G. F. Aplicação da moringa no tratamento de águas de abastecimento e residuárias. In: SILVA, G. F., et al. **Potencialidades da Moringa Oleifera Lam**. São Cristóvão: Editora UFS, 2018. p. 93-144.
- BONGIOVANI, M. C.; KONRADT-MORAES, L. C.; SAKANIVA LOURENÇO, B. S.; GRANHEN TAVARES, C. R. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 32, p. 167-170, 2010. DOI: 10.4025/actascitechnol.v32i2.8238
- BOTERO, W. G. **Caracterização do lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola**. Dissertação (Pós-graduação em Química) - Universidade Estadual Paulista. Araraquara. 2008.
- BRASIL. Decreto nº 5.440, de 4 de maio de 2005. **Estabelece definições e procedimentos sobre o controle de qualidade da água de sistemas de abastecimento e institui mecanismos e instrumentos para a divulgação de informação ao consumidor sobre a qualidade da água para consumo humano**, Brasília, maio 2005a.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**, Brasília, ago 2010.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília: FUNASA, 2014.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento - SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2019**, Brasília: SNS/MDR, 2020.
- BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde, de 28 de setembro de 2017. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**, Brasília, set 2017.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**, Brasília, mar 2005b.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. *In*: REALI, M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 1-19.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDiBe, 2011.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologia de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDiBe, 2008.

GALLÃO, M. I.; DAMASCENO, L. F.; BRITO, E. S. Avaliação química e estrutural da semente de Moringa. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, n. 1, p. 106-109, 2006.

GERHARDT, C. M. **Uma alternativa de substituição ao sulfato de alumínio no tratamento de água potável**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018.

HELLER, L. Abastecimento de água, sociedade e ambiente. *In*: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. D. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 29-54.

JESUS, T. M. **Qualidade da água da sub-bacia do rio Poxim a montante e a jusante da captação da Estação de Tratamento de Água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão. 2021.

LIBÂNIO, M. **Fundamento de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIMA JÚNIOR, R. N.; ABREU, F. O. M. S. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, Fortaleza, v. 10, n. 3, p. 709-735, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180052

LO MONACO, P. A. V.; MATOS, A. T.; RIBEIRO, I. C. A.; NASCIMENTO, F. S.; SARMENTO, A. P. Utilização de extrato de sementes de Moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuárias. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010. DOI: 10.4136 / ambi-agua.164

LORENZI, H.; MATOS, F. J. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas cultivadas**. Nova Odessa: Editora Plantarum, 2002.

MICHELAN, D. C. G. S.; AMADO, F. R. O.; SANTOS, D. G. Uso da semente Moringa oleifera no tratamento de água do rio Poxim, para dessedentação de comunidade ribeirinha. *In*: XIV Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SIBESA). **Anais**. Foz do Iguaçu, 2018.

MICHELAN, D. C. G. S.; SANTOS, W. N. A.; SANTOS, D. G.; MENDONÇA, L. C.; ROSA, T. S. Aplicação do tanino vegetal e da Moringa oleifera Lam no tratamento de água. *In*: XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA). **Anais**. Recife, 2021.

- MIRANDA, L. A. S.; MONTEGGIA, L. O. **Sistemas e processos de tratamento de águas**. Porto Alegre: (S. n), 2007.
- 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. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00161-Y
- OLIVEIRA, N. T.; NASCIMENTO, K. P.; GONÇALVES, B. O.; LIMA, F. C.; COSTA, A. L. N. Tratamento de água com *Moringa Oleífera* como coagulante/floculante natural. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, Ariquemes, v. 9, n. 1, p. 373-382, 2018. DOI: 10.31072/rcf.v9i1.539
- PÁDUA, V. L. D. Introdução ao tratamento de água. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. D. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 519-566.
- PÁDUA, V. L. D.; FERREIRA, A. C. D. S. Qualidade da água para consumo humano. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. D. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. p. 153-215.
- RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2001. 102 p.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blücher, 2009. 352 p.
- RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Blücher, 1991. 331 p.
- SABESP. **Norma Técnica Interna SABESP NTS 013: Sólidos - Método de Ensaio**. São Paulo. 1999.
- SANTOS, W. N. A.; BATISTA, I. F.; MICHELAN, D. C. G. S.; MENDONÇA; L. C. Uso do sulfato de alumínio e do tanino vegetal no tratamento de água. In: X Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe (SIMPROD). **Anais**. São Cristóvão, 2018.
- SEMARH. **Relatório Final do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe**. Aracaju. 2015.
- SOUTO, P. C.; MAIOR JÚNIOR, S. G. S. Origem, botânica e morfologia da *Moringa*. In: SILVA, G. F. E. A. **Potencialidades da *Moringa Oleifera* Lam.** São Cristóvão: Editora UFS, 2018. p. 15-36.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. São Paulo: EPUSP, 2006.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 1, 2005. 452 p.