



## **USO DA SEMENTE DE *MORINGA OLEIFERA* NO ADENSAMENTO DO LODO DE UM REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO PARA MELHORA DA QUALIDADE DO SOBRENADANTE**

**Gabrielle Soares Batista<sup>(1)</sup>**

Graduanda do curso de Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (ICT/Unesp – São José dos Campos/SP).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 – Eugênio de Melo – São José dos Campos – São Paulo – CEP: 12247-016 – Brasil - Tel.: +55 (12) 3947-9700 – e-mail: [gabrielle.batista@unesp.br](mailto:gabrielle.batista@unesp.br)

### **RESUMO**

O trabalho teve como intuito avaliar o uso de pó da semente de *Moringa oleifera* (MO) como condicionador natural de lodo para melhoria da qualidade do sobrenadante como resultado da sedimentação por gravidade. Utilizou-se a velocidade de sedimentação em massa (VSM) e o índice volumétrico de lodo (IVL) para avaliar a capacidade de sedimentação por gravidade. A clarificação do sobrenadante foi avaliada quanto à capacidade de remoção da turbidez, cor aparente, *Escherichia coli* e matéria orgânica associada à evolução do potencial zeta. Os efeitos sobre os valores de pH e condutividade elétrica também foram avaliados. Finalmente, foram examinados os efeitos sobre a toxicidade (crônica e aguda) do efluente sobrenadante. Observou-se melhora significativa da qualidade do sobrenadante com a adição de MO. Os resultados de VSM (0,16 cm/min) e IVL (53 mL/g) mostraram que o lodo tinha boa sedimentação e a adição de MO manteve essas características estatisticamente inalteradas. O aumento da dosagem de MO aumentou o potencial zeta do sobrenadante, resultando em uma dosagem ideal de 1,2 g/L, com remoção de 90% de turbidez, 70% de cor aparente, 99% de *E. coli* e 40% de matéria orgânica. Os valores de pH e condutividade elétrica não mudaram com o aumento da dosagem de MO, que é uma vantagem competitiva da adição de MO em comparação com a adição de sais de ferro e de alumínio. Observou-se redução da capacidade de remoção de matéria orgânica em doses mais elevadas do coagulante natural devido à presença de MO residual no efluente final. A dosagem ideal de MO de 1,2 g/L não afetou a toxicidade aguda ou crônica do sobrenadante. Esses resultados enfatizaram que o pó da semente de *M. oleifera* pode melhorar a qualidade do sobrenadante e pode ser potencialmente um condicionador de baixo custo e facilmente acessível para o adensamento de lodo de esgoto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coagulante natural, adensamento por gravidade, *Moringa oleifera*.

### **INTRODUÇÃO**

Há uma previsão que haja um aumento significativo na geração de lodos residuais, uma vez que o objetivo de desenvolvimento sustentável ODS 6.3.1 inclui o aumento da proporção de fluxos de águas residuais domésticas e industriais tratados com segurança até 2030 (UN, 2021). Em 2020, apenas 55,5% das águas residuais domésticas geradas globalmente foram tratadas com segurança, principalmente devido aos países de baixa e média renda. Por exemplo, em 2020, apenas 33,0% e 48,3% das águas residuais domésticas no Brasil e na Nigéria, respectivamente, foram tratadas com segurança (UN WHO, 2021). Esta questão é imperativa devido aos riscos para a saúde e o ambiente associados ao manuseio e descarte inadequados de lodo (FERREIRA *et al.*, 2021). Além disso, o custo da destinação de lodo representa mais de metade do custo total do sistema de tratamento de esgoto e a separação eficiente de líquidos e sólidos no lodo é uma das principais etapas para reduzir os custos de tratamento, transporte e descarte final (MOWLA *et al.*, 2013).

Normalmente 94% a 99% dos lodos de águas residuais não adensadas são água, e o primeiro passo do tratamento de lodo é geralmente o adensamento, que é um procedimento utilizado para aumentar o teor de sólidos em lodos, removendo uma porção da fração líquida. A sedimentação por gravidade é um dos métodos de adensamento mais comuns utilizados devido ao seu baixo custo, sendo amplamente utilizado em várias aplicações. O fluxo sobrenadante do adensamento por gravidade tem valores típicos de DBO e sólidos suspensos totais (SST) de 250 mg/L e 200 mg/L, respectivamente, o que torna inviável a reutilização deste fluxo. Normalmente ele retorna ao tanque primário de sedimentação ou ao afluente da planta de tratamento (METCALF e EDDY, 2016). A coagulação/floculação é uma das abordagens de condicionamento de lodo mais comumente usadas em relação

ao custo e à eficiência. Pequenas partículas coloidais são desestabilizadas e transformadas em agregados maiores e mais fortes para melhorar o processo de espessamento, aumentando a velocidade de sedimentação em massa (VSM) e a qualidade do sobrenadante (CHEN *et al.*, 2016).

Coagulantes de sais inorgânicos, como sais férricos e de alumínio, e floculantes poliméricos orgânicos sintéticos, incluindo poliácridamida e derivados, têm sido comprovadamente eficientes no adensamento de lodo. No entanto, esses produtos são caros e de difícil acesso para populações remotas, principalmente em países de baixa e média renda. Além disso, podem resultar em poluição secundária e acarretar muitos riscos à saúde devido a íons metálicos residuais ou à liberação de monômeros poliméricos nocivos na água, ou devido à geração de lodo tóxico (WEI *et al.*, 2018).

Coagulantes à base de plantas têm sido aplicados como alternativas aos coagulantes/floculantes químicos sintéticos convencionais, com os principais benefícios de ser seguro para os humanos, econômico, sustentável e um recurso abundante. O lodo produzido após o processo de coagulação é biodegradável e rico em nutrientes; portanto, ele pode ser processado para produzir biofertilizante. Os coagulantes à base de plantas são coagulantes naturais, solúveis em água e orgânicos derivados de várias partes e espécies de plantas, como *Opuntia ficus-indica*, *Abelmoschus esculentus* e *Moringa oleifera* (AHMAD *et al.*, 2022). Entre os coagulantes à base de plantas, sementes de *M. oleifera* receberam atenção para uso como coagulante para água potável (RIBEIRO *et al.*, 2019) e tratamentos de águas residuais (DAS *et al.*, 2021) em direção a uma economia verde e produção mais limpa.

As sementes de *M. oleifera* têm proteínas catiônicas solúveis em água com um ponto isoelétrico de pH 10 a 11 e um peso molecular que varia entre 6,5 e 30 kDa, capazes de desestabilizar colóides carregados negativamente e facilitar a coagulação por meio do mecanismo dominante de adsorção e neutralização de carga (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995). As sementes de *M. oleifera* mostraram ser eficazes no tratamento de lodo fecal e na produção de substratos que podem potencialmente aumentar o rendimento de biometano na digestão anaeróbica em comparação com as produzidas por lodo sem tratamento coagulante à base de plantas (DIMA *et al.*, 2023). A árvore de *M. oleifera* tem sido bem cultivada no cinturão tropical (VILLASEÑOR-BASULTO *et al.*, 2018) em países como o Brasil e a Nigéria, e sua semente poderia fornecer uma solução mais sustentável e acessível para o problema do condicionamento de lodo em países de baixa e média renda.

## **OBJETIVO**

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial das sementes de *M. oleifera* em melhorar a qualidade do sobrenadante quando utilizado como condicionador para adensamento gravitacional de lodo gerado por um reator anaeróbico compartimentado (RAC). O adensamento gravitacional foi avaliado em termos da velocidade de sedimentação em massa (VSM) e índice volumétrico do lodo (IVL). A qualidade do sobrenadante foi avaliado em termos de capacidade de remoção de turbidez, cor aparente, *E. coli* e matéria orgânica associada ao potencial zeta e tamanho das partículas. Os efeitos sobre os valores de pH e condutividade elétrica também foram avaliados. Finalmente, foram examinados os efeitos sobre a toxicidade (crônica e aguda) do efluente sobrenadante.

## **METODOLOGIA UTILIZADA**

### **COLETA DO LODO**

As amostras de lodo usadas para os estudos foram coletadas da estação piloto de esgoto instalada no Parque Tecnológico de São José dos Campos, Brasil (23°09'24,27" S e 45°47'30,80" W). A planta em escala piloto recebe águas residuais após tratamento preliminar (gradeamento e câmara de areia de fluxo horizontal retangular) e primário (sedimentação por gravidade) e trata 4 m<sup>3</sup>/dia em um reator anaeróbico compartimentado (RAC) com uma série de 3 câmaras, um tempo de detenção hidráulica de 6 h e uma taxa de carga orgânica de 1,6 kg DQO/(m<sup>3</sup>dia). Caracterização e decantação experimental do lodo foram realizadas imediatamente após a amostragem. Esta planta em escala piloto foi avaliada como uma alternativa para o tratamento descentralizado de águas residuais domésticas para áreas rurais, áreas periurbanas e assentamentos informais, como favelas, que têm serviços de saneamento deficientes em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

### **PREPARAÇÃO DO PÓ DA SEMENTE DE *M. OLEIFERA***

As sementes de *M. oleifera* foram adquiridas da Arbocenter, e foram colhidas na cidade de Araçatuba/SP, Brasil (20°56'19,72" S e 50°40'6,17" W). Foi utilizada a técnica mais simples e eficaz para preparar o coagulante natural, que consiste no uso direto do pó da semente (CHALES *et al.*, 2022). As sementes foram descascadas manualmente e os grãos moídos em liquidificador doméstico e peneirados em malha 14 mesh (1,18 mm) (Figura 1). As cascas obtidas do processo de descascamento foram armazenadas posteriormente para estudo de sua utilização como adsorvente (LOPES *et al.*, 2022). O pó obtido, chamado como MO, foi mantido a 4 °C em frasco fechado para evitar a deterioração das propriedades do coagulante (KATAYON *et al.*, 2016).

**Figura 1 - a) Semente de *M. oleifera* com casca; b) Semente de *M. oleifera* descascada; c) Sementes de *M. oleifera* moídas; d) Semente de *M.oleifera* peneiradas; e) Pó da semente de *M. oleifera* para ser usada diretamente como um coagulante.**



Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

### ESTUDOS DE SEDIMENTAÇÃO POR GRAVIDADE

Para avaliar a eficiência do MO a ser usada como condicionador de lodo para adensamento, 1000 mL de lodo foram combinados com dosagens de MO variando de 0,2 a 1,4 g/L e agitados a 40 rpm por 1 min. A velocidade de rotação e o tempo de agitação adotados foram selecionados para evitar a quebra dos flocos biológicos do lodo (MUYIBI *et al.*, 2001), e as dosagens de MO foram selecionadas com base em testes preliminares. As amostras foram imediatamente transferidas para provetas de 1000 mL, e as alturas iniciais do lodo foram registradas. Uma amostra de lodo de controle sem adição de MO também foi colocada em uma proveta e a altura inicial do lodo foi registrada. A altura da interface sólido-líquido foi registrada em intervalos de 1 min até 30 min, e uma amostra do sobrenadante foi coletada. A velocidade de sedimentação em massa (VSM) foi calculada pela inclinação da altura da interface (cm) versus tempo (min) para avaliar o comportamento de sedimentação do lodo em diferentes tempos de sedimentação. O índice volumétrico de lodo foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$IVL = \frac{VLD \times 100}{SST} \quad (1)$$

Onde IVL é o índice volumétrico do lodo (mL/g), VLD é o volume de lodo decantado em 30 minutos (mL/L) e SST é a concentração total de sólidos suspensos (mg/L) do lodo. O valor de SST aumentou com a dosagem de MO, e essa variação foi considerada no cálculo do IVL. IVL normalmente é usado para monitorar as características de sedimentação de lodo ativado e outras suspensões biológicas (APHAS, 2017).

### PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

A caracterização do lodo bruto e das amostras sobrenadantes após os estudos de sedimentação por gravidade foi realizada por meio da medição de parâmetros físico-químicos de acordo com as metodologias dos Métodos Padrão para o Exame de Água e Esgoto (APHAS, 2017). Os parâmetros de caracterização do lodo incluíram sólidos totais (STs), sólidos fixos totais (SFTs), sólidos voláteis totais (SVTs), sólidos suspensos totais (SSTs), sólidos suspensos fixos totais (SSFTs), sólidos suspensos voláteis totais (SSVTs), pH (Tecnopon mPa210) e alcalinidade (curva de titulação potenciométrica). A análise de caracterização do sobrenadante incluiu pH, turbidez (nefelômetro Policontrol AP2000), cor aparente (Policontrol AquaColor), condutividade (Tecnopon mCA150), potencial zeta e distribuição de tamanho de partícula (Delsa Nano C Particle Analyzer da Beckman Coulter) e demanda biológica de oxigênio (sistema de sensor Velp Científica BOD EVO 6).

O monitoramento do conteúdo de matéria orgânica sobrenadante foi realizado de acordo com a dosagem de MO via absorção ultravioleta a 254 nm (ThermoFisher Scientific Spectrophotometer UV—Vis Genesis 50), que foi escolhido devido à absorção UV de muitos dos componentes orgânicos conhecidos de águas residuais, e tem sido relatado na literatura como tendo uma alta correlação com os resultados de carbono orgânico total (COT) e demanda química de oxigênio (DQO) de água e águas residuais. Este método tem as vantagens de ser um método simples, rápido e de baixo custo quando comparado às técnicas convencionais de análise de COT, DBO e DQO (DOBBS *et al.*, 1972; ALBREKTIEN *et al.*, 2012).

## **ESCHERICHIA COLI E EVOLUÇÃO DA TOXICIDADE NO SOBRENADANTE**

*Escherichia coli* no sobrenadante do lodo (após experimentos de sedimentação) foi enumerada em dosagens de MO de 0,0 (controle), 0,8, 1,0, 1,2 e 1,4 g/L. As amostras de sobrenadante foram diluídas em uma série de 10 vezes, e as diluições apropriadas foram usadas na enumeração subsequente utilizando-se o ágar *Escherichia coli* modificada termotolerante por membrana (mTEC modificada) de acordo com o método EPA 1603 (USEPA, 2014). Os resultados foram expressos como unidades formadoras de colônias (UFC) por 100 ml de amostra.

A toxicidade aguda foi avaliada com *Daphnia similis* de acordo com a metodologia da norma brasileira NBR 12.713 (ABNT, 2016). Os resultados foram expressos como concentração efetiva CE(I)50 48h, que é a concentração da amostra no início do teste que teve efeito agudo (imobilidade) em 50% dos organismos expostos em 48h. O pH, a condutividade, a dureza, e o oxigênio dissolvido das amostras e controles foram determinados no início e no final dos testes de toxicidade.

A toxicidade crônica foi avaliada com *Ceriodaphnia dubia* de acordo com a metodologia da norma brasileira NBR 13.373 (ABNT, 2016). Com este método, a toxicidade crônica foi medida usando neonatos com menos de 24 horas de idade durante um teste de renovação estática triplicata (sete dias). Os efeitos incluíram os efeitos sinérgicos, antagonistas e aditivos de todos os componentes químicos, físicos e biológicos que afetaram negativamente as funções fisiológicas e bioquímicas dos organismos de ensaio. Para os cálculos estatísticos, foram considerados os critérios de reprodução e mortalidade, e a sensibilidade do organismo de teste foi avaliada paralelamente a todos os ensaios de toxicidade. Os resultados foram expressos como a concentração de inibição CI(I)50, que é a concentração nominal da amostra que causou uma redução de 50% na reprodução dos organismos testados em comparação com a do controle após sete dias de exposição. Os resultados também foram expressos como a concentração sem efeito observado (NOEC), que é a maior concentração nominal do agente tóxico que não causa efeito deletério estatisticamente significativo na sobrevivência e reprodução dos organismos após sete dias de exposição sob as condições de teste (ECHA, 2008).

As amostras foram classificadas de acordo com sua toxicidade com base nos valores médios de CE(I)50 ou CI(I)50 usando uma escala de toxicidade relativa modificada (Tabela 1).

**Tabela 1 - Classificação dos dados de toxicidade de acordo com os valores CE(I)50 ou CI(I)50.**

CI(I)50 / CE(I)50 (%)	TOXICITY
<25	Altamente tóxico
25 ≥ E < 75	Tóxico
75 ≥ E < 100	Moderadamente tóxico
≥ 100	Não tóxico

Fonte: Adaptado de Bulich (1982) e Libralato *et al.* (2010).

## **ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Todos os experimentos foram conduzidos em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos resultados. Os dados obtidos dos experimentos foram comparados por *one-way ANOVA* e teste de comparação múltipla post hoc de *Tukey*. O teste *Shapiro-Wilk* foi realizado para examinar se os dados eram normalmente distribuídos. O nível de significância foi estabelecido em 5%.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **CARACTERIZAÇÃO DO LODO NÃO ADENSADO**

As características das amostras de lodo de esgoto bruto (Tabela 2) mostraram concentrações típicas de lodo não adensado (METCALF e EDDY, 2016). O ST de 1,9% está de acordo com as concentrações típicas para o uso

de um adensador por gravidade (1-6%), e espera-se que o lodo adensado atinja 3 a 10% de ST após a sedimentação (METCALF e EDDY, 2016).

**Tabela 2 - Características do lodo não adensado**

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
Sólidos Totais – ST (%)	1,9	± 0,7
Sólidos Fixos Totais – SFT (%)	0,5	± 0,2
Sólidos Voláteis Totais – SVT (%)	1,2	± 0,6
SVT/ST (%)	69	± 4
Sólidos Suspensos Totais – SST (%)	18	± 7
Sólidos Suspensos Fixos Totais – SSFT (%)	4,4	± 2,2
Sólidos Suspensos Voláteis Totais – SSVT (%)	13,5	± 4,4
SSVT/SST (%)	76	± 4
pH	7,4	± 0,2
Alcalinidade (mg/L)	1137	± 201

Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

### CARACTERIZAÇÃO DO SOBRENADANTE DO LODO ADENSADO (SEM ADIÇÃO DE MO)

As características do sobrenadante das amostras de lodo adensado sem adição de MO são mostradas na Tabela 3. Os altos valores de turbidez, cor aparente, DBO e *E.coli* apresentados na Tabela 3 mostram que o descarte ou reutilização do sobrenadante do lodo adensado não é recomendado. Ele precisa ser devolvido ao afluente da estação de tratamento ou sofrer um tratamento que melhore essas propriedades.

**Tabela 3 - Características do sobrenadante de amostras de lodo adensado sem adição de MO**

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
Turbidez (NTU)	180	± 58
Cor Aparente (CU)	343	± 45
pH	7.6	± 0.1
Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1147	± 125
DBO (mg/L)	166	± 63
Matéria orgânica ( $\text{UV}_{254} \text{ cm}^{-1}$ )	1.290	± 0.109
<i>Escherichia coli</i> (CFU/100 mL)	$3.8 \times 10^5$	$\pm 0.4 \times 10^5$

Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

As partículas em suspensão do sobrenadante apresentaram uma faixa de distribuição de tamanho de partícula entre 0,7  $\mu\text{m}$  a 90  $\mu\text{m}$  e um D50 de  $6,7 \pm 1,5 \mu\text{m}$ . Como a amostra do sobrenadante é coletada somente após 30 minutos de sedimentação, é esperado que as partículas suspensas remanescentes tenham características de tamanho coloidal. A mobilidade eletroforética (ME) das partículas no sobrenadante do lodo tem uma média de  $-1,64 \pm 0,07 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , o que é indicativo de um potencial zeta de  $-21,0 \pm 0,9 \text{ mV}$ . Com base nesses resultados, supõe-se que a existência de partículas coloidais carregadas negativamente impede a formação de flocos maiores. A adição de um coagulante pode desestabilizar essas partículas, permitindo a formação de flocos maiores com tamanho suficiente para sedimentar, clarificando o sobrenadante (METCALF e EDDY, 2016).

### PROPRIEDADES DA SEDIMENTAÇÃO POR GRAVIDADE

O índice volumétrico do lodo (IVL) e a velocidade de sedimentação em massa (VSM) resultantes da sedimentação por gravidade do lodo com diferentes dosagens de MO mostram que os tratamentos não são significativamente diferentes no nível de 0,05, com uma média, incluindo todas as dosagens de MO e o controle, de  $0,16 \pm 0,09 \text{ cm}/\text{min}$  e  $53 \pm 17 \text{ mL}/\text{g}$  para VSM e IVL, respectivamente (Tabela 4).

**Tabela 4 – Índice volumétrico do lodo (IVL) e velocidade de sedimentação em massa (VSM) do lodo após 30 min. de sedimentação com diferentes dosagens de MO.**

Dosagem de MO (g/L)	IVL (mL/g)		VSM (cm/min)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Controle (0)	50	± 16	0,15	±0,12
0,2	50	± 15	0,14	±0,12
0,4	45	± 16	0,15	±0,18
0,6	53	± 20	0,17	±0,10
0,8	52	± 19	0,17	±0,07
1,0	52	± 19	0,18	±0,08
1,2	58	± 16	0,17	±0,10
1,4	61	± 15	0,19	±0,08

Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

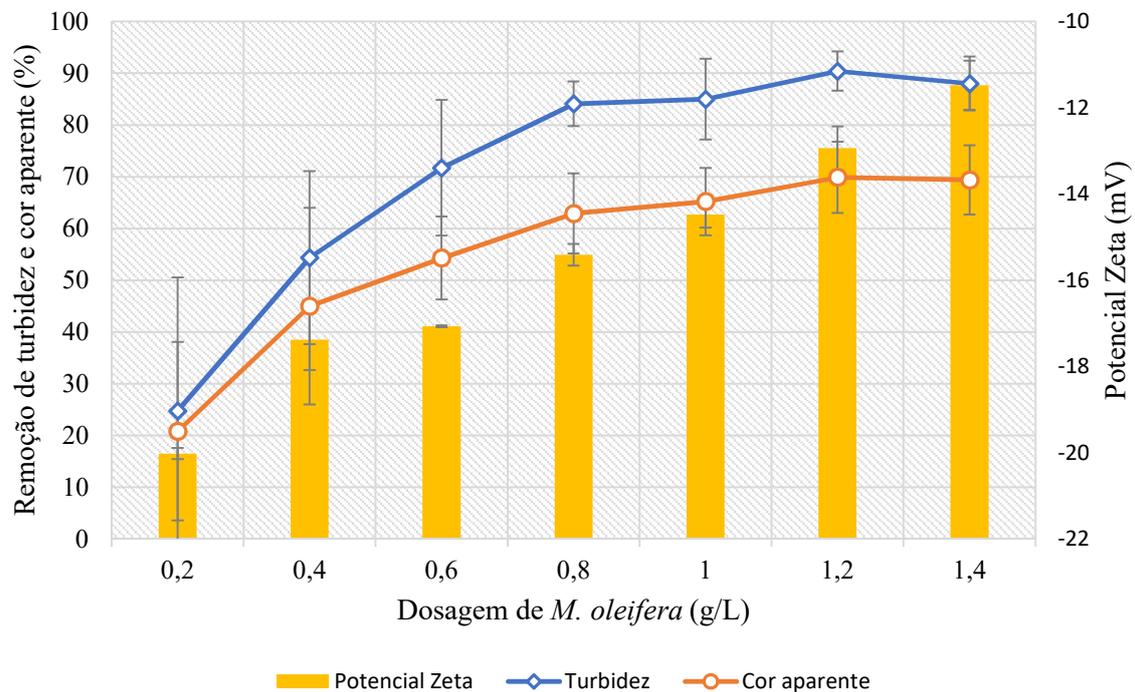
A provável razão para a falta da melhora nas variáveis IVL e VSM após a adição de MO é que o lodo bruto já apresenta um valor de IVL muito bom ( $50 \pm 16$  mL/g), pois valores abaixo de 100 mL/g são considerados indicativos de lodo bem sedimentado (METCALF e EDDY, 2016). Reatores anaeróbios compartimentados (RAC) têm mostrado potencial para produzir lodo granular e, portanto, a capacidade de sedimentação do lodo é considerada alta (SALLIS e UYANIK, 2003). Resultados semelhantes foram relatados por (GOLD *et al.*, 2016), que avaliou o uso de um extrato aquoso de semente de *M. oleifera* no adensamento do lodo, e os resultados indicaram que o condicionamento não aumenta a VS, mas aumenta a remoção de SST do sobrenadante.

### **AValiação DO SOBrenadante DO LODO Adensado**

A remoção da turbidez e da cor aparente, e o potencial zeta do sobrenadante do lodo adensado após a adição de diferentes dosagens de MO são mostrados na Figura 2. A remoção da turbidez e da cor aparente aumenta com o aumento da dosagem de MO até que um valor máximo e constante seja obtido em uma dosagem de 1,2 g/L de MO, correspondendo a remoção de  $90,4 \pm 3,8\%$  de turbidez e  $69,9 \pm 6,9\%$  de cor aparente. A razão para este perfil de remoção de turbidez e cor aparente com o aumento da dosagem MO está relacionada ao aumento do potencial zeta das partículas presentes no sobrenadante, que passa de um valor inicial de  $-21,0 \pm 0,9$  mV (sem adição de MO) a  $-12,9 \pm 0,5$  mV (1,2 g/L MO). Aumentar a dosagem para 1,4 g/L aumenta o potencial zeta para  $-11,5 \pm 0,6$ , mas não altera significativamente a remoção de turbidez e cor aparente. Isso está de acordo com o mecanismo de coagulação por adsorção e neutralização de cargas, pois o potencial zeta das partículas presentes no sobrenadante é neutralizado a ponto de as forças atrativas superarem as forças repulsivas, formando flocos maiores e clarificando o sobrenadante (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995).

O principal mecanismo de coagulação das sementes de MO foi relatado como sendo a floculação devido à neutralização de carga causada pela adsorção de proteínas catiônicas (UEDA YAMAGUCHI *et al.*, 2021). É um desafio comparar os resultados com a literatura, dada a escassez de estudos utilizando sementes de *M. oleifera* para clarificar o sobrenadante de lodo adensado. Gold *et al.* (2016) avaliaram o uso do extrato aquoso da semente de *M. oleifera* no adensamento do lodo, e a sedimentação foi ótima em dosagens de aproximadamente 6-8 mL/g ST, com redução do SST no sobrenadante de 81- 95%.

**Figura 2- Influência do aumento da dosagem de MO no potencial zeta e na remoção de turbidez e cor aparente no sobrenadante de lodo adensado**



Fonte: Elaborada pelos Autores (2023).

Apesar do aumento da dosagem de MO, o pH do sobrenadante do lodo e a condutividade elétrica permaneceram estáveis (Tabela 5). Ambos não apresentam diferença estatisticamente significativa no nível 0,05 com diferentes dosagens de MO. Incluindo todas as dosagens de MO e o controle, o valor médio de pH é  $7,6 \pm 0,1$  e a condutividade elétrica é  $1151 \pm 122 \mu\text{S/cm}$ . Resultados semelhantes têm sido relatados na literatura, sendo esta uma vantagem competitiva do uso de sementes de *M. oleifera* quando comparado ao uso de coagulantes sintéticos de alumínio e sais de ferro, que normalmente reduzem o pH e aumentam a condutividade elétrica em função da liberação de prótons  $\text{H}^+$  (METCALF e EDDY, 2016; CHALES *et al.*, 2022).

**Tabela 5 – Influência no aumento da dosagem de MO no pH e na condutividade elétrica do sobrenadante do lodo adensado.**

Dosagem de MO (g/L)	pH		Condutividade elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Control (0)	7,6	$\pm 0,1$	1.147	$\pm 125$
0,2	7,7	$\pm 0,1$	1.111	$\pm 152$
0,4	7,6	$\pm 0,1$	1.132	$\pm 143$
0,6	7,6	$\pm 0,1$	1.161	$\pm 138$
0,8	7,6	$\pm 0,1$	1.161	$\pm 149$
1,0	7,5	$\pm 0,1$	1.143	$\pm 127$
1,2	7,5	$\pm 0,1$	1.184	$\pm 62$
1,4	7,5	$\pm 0,1$	1.134	$\pm 143$

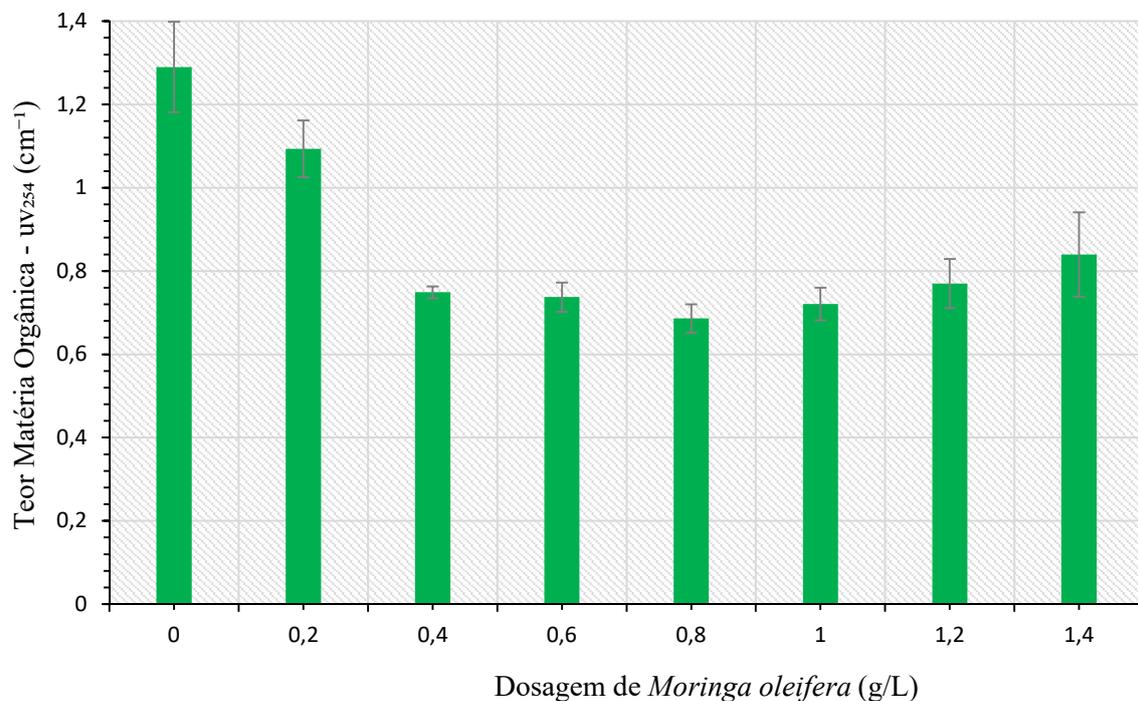
Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

O perfil de matéria orgânica do sobrenadante do lodo adensado com a adição de diferentes dosagens de MO é mostrado na Figura . Uma remoção de matéria orgânica de  $40,3 \pm 5,9\%$  é alcançada em 1,2 g/L MO (ótima dosagem de remoção de turbidez). Essa capacidade de remover matéria orgânica se deve à remoção de sólidos suspensos do sobrenadante, conforme confirmado pelos resultados de remoção de turbidez. Por outro lado, apesar dos valores de remoção de matéria orgânica no sobrenadante serem estatisticamente iguais (com 95% de confiança) nas dosagens de 0,4 a 1,4 g/L, a partir das dosagens de 0,8 g/L observa-se uma tendência crescente da matéria orgânica com o aumento da dosagem de MO.

As sementes de *M. oleifera* contêm aproximadamente 36,7% de proteínas, 34,6% de lipídios e 5% de carboidratos (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995), que quando utilizados sem uma etapa avançada de purificação de proteínas catiônicas, podem levar a um aumento de matéria orgânica dependendo da dosagem aplicada (CHALES *et al.*, 2022; VEGA ANDRADE *et al.*, 2021).

Gold *et al.* (2016) avaliaram o uso de extrato aquoso da semente de *M. oleifera* no adensamento do lodo, que reduziu a DQO do sobrenadante em dosagens abaixo de 6-8 mL/g ST, enquanto esse valor aumentou em dosagens maiores. Portanto, sementes brutas de *M. oleifera* devem ser usadas com cautela em altas dosagens para evitar a presença de matéria orgânica residual no efluente.

**Figura 3 - Influência do aumento da dosagem de MO na matéria orgânica no sobrenadante do lodo adensado**



Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

A Tabela apresenta a influência do aumento da dosagem de *Moringa oleifera* (MO) na remoção de *Escherichia coli* no sobrenadante do lodo adensado. O perfil de remoção de *E. coli* é semelhante ao demonstrado na remoção de turbidez e cor aparente (Figura 2) com o aumento da dosagem de MO. Um nível ótimo de remoção de *E. coli* ( $98,7\% \pm 0,2\%$ ) é alcançado em 1,2 g/L MO. Junto com a turbidez, os microrganismos presentes na água também podem ser removidos durante a sedimentação após a desestabilização por meio da adição do pó da semente de *M. oleifera* e a formação de partículas maiores (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995).

Vega Andrade *et al.* (2021) relataram 99,7% de remoção de *E. coli* adicionando 0,6 g/L de extrato aquoso de *M. oleifera* em um tratamento terciário de efluente após sedimentação e filtração granular rápida, e a capacidade de remover *E. coli* foi atribuída principalmente a processos físicos, uma vez que a dosagem de MO estudada (0,3-0,75 g/L) não mostrou efeito antibacteriano significativo contra *E. coli*.

Dosagens mais altas de MO resultaram em capacidade de inibição microbiana, como no caso de Virk *et al.* (2019), que relataram uma concentração inibitória mínima de 12,5 g/L MO contra *E. coli*, e Taiwo *et al.* (2020), que demonstraram que 40 g/L de MO tinha atividade antimicrobiana contra cinco cepas bacterianas. Assim, considerando a dosagem aplicada neste estudo (máximo de 1,4 g/L), acredita-se que o mecanismo dominante de remoção de *E. coli* sejam processos físicos (sedimentação) e não qualquer efeito antibacteriano da semente de *M. oleifera*.

**Tabela 6 - Influência do aumento da dosagem de MO na contagem e remoção de *Escherichia coli* no sobrenadante do lodo adensado**

Dosagem de MO (g/L)	Contagem (CFU/100 mL)	Remoção (%)
0,0 (controle)	$3,8 \pm 0,4 \times 10^5$	-
0,8	$3,6 \pm 0,4 \times 10^4$	$90,5 \pm 1,1\%$
1,0	$3,1 \pm 0,4 \times 10^4$	$91,8 \pm 0,9\%$
1,2	$5,1 \pm 0,6 \times 10^3$	$98,7 \pm 0,2\%$
1,4	$5,4 \pm 0,6 \times 10^3$	$98,6 \pm 0,2\%$

Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

O uso de MO na dosagem ideal de 1,2 g/L não altera a toxicidade do sobrenadante, que permanece levemente tóxico em termos de toxicidade aguda, e tóxico em termos de toxicidade crônica (Tabela ). Silva *et al.* (2021) avaliaram a toxicidade aguda e crônica do esgoto tratado usando um UASB (reator anaeróbico de fluxo ascendente) e descobriram que o esgoto permaneceu altamente tóxico para *C. dubia* (crônico) e tóxico para *D. rerio* (agudo) após o tratamento. Dupont e Lobo (2012) avaliaram a toxicidade aguda e crônica do esgoto tratado usando um UASB seguido de um sistema de biofiltro e um tanque de decantação secundário e verificaram que o esgoto permaneceu altamente tóxico para *C. dubia* (crônico) e tóxico para *D. magna* (aguda) após o tratamento. Para ambos os estudos, um pós-tratamento foi indicado para reduzir a toxicidade do efluente.

**Tabela 7 - Toxicidade aguda e crônica do sobrenadante bruto e após 1,2 g/L de MO.**

Dosagem de MO (g/L)	Toxicidade Aguda (%)		Toxicidade Crônica (%)
	CE(I)50 - 48h	CI(I)50 - 7 dias	NOEC - 7 dias
0,0 (controle)	$83,33 \pm 2,1$	$36,43 \pm 2,92$	$20 \pm 2,1$
1,2	$83,33 \pm 2,1$	$39,59 \pm 5,41$	$20 \pm 2,1$

Fonte: Elaborada pela Autora (2023).

## CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o desempenho do pó da semente de *Moringa oleifera* (MO) como um coagulante natural para melhoria da qualidade do sobrenadante quando usado como um condicionador de lodo antes do adensamento através da sedimentação por gravidade do lodo gerado a partir de um reator anaeróbico compartimentado (RAC). O sobrenadante foi observado com a adição de MO, e a velocidade de sedimentação em massa, VSM ( $0,16 \pm 0,09$  cm/min), e o índice volumétrico do lodo, IVL ( $53 \pm 17$  mL/g) mostraram que o lodo tinha boa sedimentabilidade, e a adição de MO manteve essas características estatisticamente inalteradas. O aumento da dosagem de MO aumentou o potencial zeta do sobrenadante, resultando em uma melhor dosagem de 1,2 g/L, o que resultou na remoção de  $90,4 \pm 3,8\%$  de turbidez,  $69,9 \pm 6,9\%$  de cor aparente,  $98,7 \pm 0,2\%$  de *E. coli*, e  $40,3 \pm 5,9\%$  de matéria orgânica.

O pH e a condutividade elétrica os valores não mudaram com o aumento da dosagem de MO, o que é uma vantagem competitiva da adição de MO em comparação com a adição de sais de ferro e alumínio. Observou-se redução na capacidade de remoção de matéria orgânica em dosagens mais elevadas do coagulante natural devido à presença de MO residual da semente no efluente final. A adição de 1,2 g/L MO não alterou significativamente a toxicidade do sobrenadante, com uma toxicidade aguda de  $83,3 \pm 2,1\%$  EC(1)50 média de 48 h e uma

toxicidade crônica média de  $39,59 \pm 5,41\%$  IC(I)50 7 dias, que são indicativos de um efluente levemente tóxico e tóxico, respectivamente. Esses resultados enfatizam que o pó de sementes de MO pode melhorar a qualidade do sobrenadante e tem potencial para ser usado como um condicionador de baixo custo e facilmente acessível para o espessamento de lodo de águas residuais domésticas em países de baixa e média renda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMAD, A.; KURNIAWAN, S.B.; ABDULLAH, S.R.S.; OTHMAN, A.R.; HASAN, H.A. *Exploring the extraction methods for plant-based coagulants and their future approaches*. *Sci. Total Environ.*, v. 818, p. 151668, 2022.
2. ALBREKTIEN, E. R.; RIMEIKA, M.; ZALIECKIEN, E. E.; ŠAULYS, V.; ZAGORSKIS, A. *Determination of Organic Matter by UV Absorption in the GroundWater*. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.*, v. 20, p. 163–167, 2012.
3. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed.; American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation: Washington, DC, USA, 2017.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. *Aquatic Ecotoxicology-Acute Toxicity test with Daphnia spp. (Cladocera, Crustacea)*, 4th ed.; NBR 12713; ABNT: Rio de Janeiro, Brazil, 2016.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. *Aquatic Ecotoxicology-Chronic Toxicity-Test Method with Ceriodaphnia spp. (Crustacea, Cladocera)*, 6th ed.; NBR 13373; ABNT: Rio de Janeiro, Brazil, 2022.
6. BULICH, A.A. *A practical and reliable method for monitoring the toxicity of aquatic samples*. *Process Biochem.*, v. 17, p. 45–47, 1982.
7. CHALES, G.G.; TIHAMERI, B.S.; MILHAN, N.V.M.; KOGA-ITO, C.Y.; ANTUNES, M.L.P.; REIS, A.G.D. *Impact of Moringa oleifera Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water*. *Water*, v. 14, p. 2058, 2022.
8. CHEN, W.; ZHENG, H.L.; GUAN, Q.Q.; TENG, H.K.; ZHAO, C.L.; ZHAO, C. *Fabricating a flocculant with controllable cationic microblock structure: Characterization and sludge conditioning behavior evaluation*. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 55, p. 2892–2902, 2016.
9. DAS, N.; OJHA, N.; MANDAL, S.K. *Wastewater treatment using plant-derived bioflocculants: Green chemistry approach for safe environment*. *Water Sci. Technol.*, v. 83, p. 1797–1812, 2021.
10. DIMA, F.A.F.J.; LI, Z.; ZHOU, X.; ZHU, L. *Plant seed-based bio-coagulant development and application for fecal sludge treatment and biogas production improvement*. *Biomass Convers. Biorefinery*, 2023.
11. DOBBS, R.A.; WISE, R.H.; DEAN, R.B. *The use of ultra-violet absorbance for monitoring the total organic carbon content of water and wastewater*. *Water Res.*, v. 6, p. 1173–1180, 1972.
12. DÜPONT, A.; LOBO, E.A. *Evaluation of the efficiency of the sewage treatment plant from the University of Santa Cruz do Sul (UNISC), RS, Brazil*. *Acta Limnol. Bras.*, v.24, p. 119–126, 2012.
13. ECHA. European Chemicals Agency. Chapter R.10: *Characterisation of dose [concentration]-response for environment*. In *Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment*; European Chemicals Agency: Helsinki, Finland, 2008.
14. FERREIRA, M.M.; FIORE, F.A.; SARON, A.; SILVA, G.H.R. *Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: State of the art and potentials*. *Water Sci. Technol.*, v. 84, p. 3469–3488, 2021.

15. GOLD, M.; DAYER, P.; FAYE, M.C.A.S.; CLAIR, G.; SECK, A.; NIANG, S.; MORGENROTH, E.; STRANDE, L. *Locally produced natural conditioners for dewatering of faecal sludge. Environ. Technol.*, v. 37, p. 2802–2814, 2016.
16. KATAYON, S.; NG, S.C.; JOHARI, M.M.N.M.; GHANI, L.A.A. *Preservation of coagulation efficiency of Moringa oleifera. A natural coagulant. Biotechnol. Bioprocess Eng.*, v. 6, p. 489–495, 2006.
17. LIBRALATO, G.; ANNAMARIA, V.G.; FRANCESCO, A. *How toxic is toxic? A proposal for wastewater toxicity hazard assessment. Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 73, p. 1602–1611, 2010.
18. LOPES, C.A.; ROLEDO, C.; REIS, A.G. *Moringa oleifera seed husks for methylene blue dye adsorption: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic analyses. Rev. Ambiente Água*, v. 17, p. e2812, 2022.
19. METCALF, L.; EDDY, H.P. *Wastewater Engineering—Treatment and Resource Recovery*, 5th ed.; McGraw Hill Education: Porto Alegre, Brazil, 2016.
20. MOWLA, D.; TRAN, H.N.; ALLEN, D.G. *A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes. Biomass Bioenergy*, v. 58, p. 365–378, 2013.
21. MUYIBI, S.A.; NOOR, M.J.M.M.; ONG, D.T.; KAI, K.W. *Moringa oleifera seeds as a flocculant in waste sludge treatment. Int. J. Environ. Stud.*, v. 58, p. 185–195, 2001.
22. NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S.; TALBOT, B.G. *Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. Water Res.*, v. 29, p. 703–710, 1995.
23. RIBEIRO, J.V.M.; ANDRADE, P.V.; DOS REIS, A.G. *Moringa oleifera seed as a natural coagulant to treat low-turbidity water by in-line filtration. Rev. Ambiente Água*, v. 14, p. e2442, 2019.
24. SALLIS, P.J.; UYANIK, S. *Granule development in a split-feed anaerobic baffled reactor. Bioresour. Technol.*, v. 89, p. 255–265, 2003.
25. SILVA, P.R.; MOUNTEER, A.H.; BENJAMIN, L.A.; ALMEIDA, E.R.; VITORINO, F.B.; ARCANJO, G.S.; VINÍCIUS RODRIGUES DOS SANTOS PETERSEN, V.R.S. *Evaluation of toxicity and estrogenicity in UASB-Treated municipal sewage. Chemosphere*, v. 268, p. 128778, 2021.
26. TAIWO, A.S.; ADENIKE, K.; ADERONKE, O. *Efficacy of a natural coagulant protein from Moringa oleifera (Lam) seeds in treatment of Opa reservoir water, Ile-Ife, Nigeria. Heliyon*, v. 6, p. e03335, 2020.
27. UEDA YAMAGUCHI, N.; CUSIOLI, L.F.; QUESADA, H.B.; CAMARGO FERREIRA, M.E.; FAGUNDES-KLEN, M.R.; SALCEDO VIEIRA, A.M.; GOMES, R.G.; VIEIRA, M.F.; BERGAMASCO, R. *A review of Moringa oleifera seeds in water treatment: Trends and future challenges. Process Saf. Environ. Prot.*, v. 147, p. 405–420, 2021.
28. UN HABITAT; WHO. *Progress on Wastewater Treatment—Global Status and Acceleration Needs for SDG Indicator 6.3.1.*; United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat); World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland, 2021.
29. UNITED NATIONS. *Department of Economics and Social Affairs. Sustainable Development—The 17 Goals*. 2021. Available online: <https://sdgs.un.org/goals> (acesso em 14 fevereiro 2023).
30. USEPA—United States Environmental Protection Agency. Method 1603: *Escherichia coli (E. coli) in Water by Membrane Filtration Using Modified Membrane-Thermotolerant Escherichia coli Agar (Modified mTEC)*; EPA 821-R-14-010; United States Environmental Protection Agency, Office of Water: Washington, DC, USA, 2014.

31. VEGA ANDRADE, P.; PALANCA, C.F.; OLIVEIRA, M.A.C.; ITO, C.Y.K.; REIS, A.G. *Use of Moringa oleifera seed as a natural coagulant in domestic wastewater tertiary treatment: Physicochemical, cytotoxicity and bacterial load evaluation. J. Water Process Eng.*, v. 40, p. 101859, 2021.
32. VILLASEÑOR-BASULTO, D.L.; ASTUDILLO-SÁNCHEZ, P.D.; DEL REAL-OLVERA, J.; BANDALA, E.R. *Wastewater treatment using Moringa oleifera Lam seeds: A review. J. Water Process Eng.*, v. 23, p. 151–164, 2018.
33. VIRK, A.K.; KUMARI, C.; TRIPATHI, A.; KAKADE, A.; LI, X.; KULSHRESTHA, S. *Development and efficacy analysis of a Moringa oleifera based potable water purification kit. J. Water Process Eng.*, v. 27, p. 37–46, 2019.
34. WEI, H.; GAO, B.; REN, J.; LI, A.; YANG, H. *Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. Water Res.*, v. 143, p. 608–631, 2018.