

Avaliação das folhas, vagens e sementes da *moringa oleifera* na remoção de Ba²⁺ em água

Evaluation of leaf, vegetable, and seeds of *moringa oleifera* in the removal of Ba²⁺ in water

DOI:10.34117/bjdv7n12-258

Recebimento dos originais: 12/11/2021

Aceitação para publicação: 08/12/2021

Vanessa Souza Reis Melo

Mestre

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Rua Dr. Randolpho Borges Júnior 1250, Univerdecidade, Uberaba, Brazil

Mário Sérgio da Luz

Doutor

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Rua Dr. Randolpho Borges Júnior 1250, Univerdecidade, Uberaba, Brazil

E-mail: mario.luz@uftm.edu.br

Bruna Vieira Cabral

Doutora

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Rua Dr. Randolpho Borges Júnior 1250, Univerdecidade, Uberaba, Brazil

Brunno Borges Canelhas

Doutor

Instituição: Instituto Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Av. Dr. Florestan Fernandes, 131, Univerdecidade, Uberaba, Brazil

Diego Andrade Lemos

Doutor

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Rua Dr. Randolpho Borges Júnior 1250, Univerdecidade, Uberaba, Brazil

RESUMO

A água é componente essencial para a vida de todas as espécies. Para os seres humanos além da necessidade de ingestão diária, ela também é utilizada em diversas atividades, como higiene pessoal, limpeza e processos industriais. Porém, somente a parcela da água não salina e isenta de contaminantes pode ser utilizada nas atividades humanas. Dentre os principais agentes poluidores dos recursos hídricos, o presente trabalho destaca os metais tóxicos. Estes compostos apresentam alta toxicidade mesmo em baixas concentrações, principalmente por sua característica de bioacumulação. Destaca-se ainda não serem facilmente degradados em componentes menos tóxicos e possuem elevado tempo de residência no corpo hídrico, sendo um risco à saúde humana e aos ecossistemas. O bário é um metal alcalino terroso cuja toxicidade é reconhecida há bastante tempo. Ele é encontrado em pequenas concentrações nas águas naturais, principalmente sob a forma de barita (BaSO₄). Não sendo encontrado livre na natureza, devido a sua elevada

reatividade. As principais ações antrópicas que emitem bário no meio ambiente são: perfuração de poços; produção de pigmentos, fogos de artifício, vidros e defensivos agrícolas; e purificação do minério barita com o subsequente descarte dos efluentes. Nas águas naturais o bário apresenta concentração média de $0,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ devido à baixa solubilidade de seus sais. Os sais de bário mais solúveis são os cloretos, os nitratos e os carbonatos. A intoxicação pelo bário pode causar náuseas, vômitos, diarreias, perda de reflexos e paralisia muscular e pode levar a óbito se não houver tratamento. A biossorção de metais potencialmente tóxicos tem-se mostrado uma alternativa no tratamento de águas contaminadas, por ser uma técnica de baixo custo e rápida. Dentre os biossorbentes, destaca-se os resíduos da Moringa oleífera que possuem grande quantidade de poros e área superficial, indicando boa capacidade de adsorção para o tratamento de águas superficiais e efluentes, sendo uma alternativa aos tratamentos convencionais. O potencial da Moringa oleífera tem sido estudado no tratamento de água e efluentes contaminados por meio de processos de coagulação e adsorção. A biomassa da moringa demonstrou capacidade de melhorar os parâmetros de qualidade da água, incluindo pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos, fluoreto, dureza e remoção de contaminantes. Sendo assim, este trabalho propôs a avaliação da eficiência da biomassa de Moringa oleífera em suas frações folha e vagem e semente, na remoção de bário em água. Foram realizados ensaios de adsorção conforme o planejamento experimental, para avaliação das seguintes variáveis: tipo (folha e vagem e semente), quantidade biomassa (0,32g a 1,68g), diâmetro de partículas da biomassa (partículas menores que $425 \mu\text{m}$, partículas entre $425 \mu\text{m}$ e $600 \mu\text{m}$, entre $600 \mu\text{m}$ e $1180 \mu\text{m}$, entre $1180 \mu\text{m}$ e $1750 \mu\text{m}$ e maiores que $1750 \mu\text{m}$) e diferentes concentrações iniciais de bário ($6,40$ a $33,45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). As folhas da moringa apresentaram 98,6% de remoção de Ba^{2+} , as vagens da moringa 98,2%, e as sementes da moringa apresentaram 99,8% de remoção de Ba^{2+} . Como a semente foi a amostra que demonstrou melhor percentual de remoção no planejamento experimental, ela foi analisada de acordo com os modelos de isotermas de adsorção de Freundlich e de Langmuir em três temperaturas (25°C , 35°C e 45°C). Com base nos coeficientes de correlação (R^2), o modelo que mostrou melhor ajuste para os dados experimentais de biossorção do bário pelas sementes foi o de Freundlich, indicando, portanto, um processo de biossorção que pode ocorrer em multicamada. O estudo da cinética de adsorção também foi realizado utilizando a semente de moringa e os dados dos ensaios não se ajustaram ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem. O melhor ajuste foi observado aplicando o modelo de pseudo-segunda ordem. Conclui-se que os resultados demonstram que as folhas, vagens e sementes de Moringa oleífera são biomassas eficientes na adsorção bário.

Palavras-chave: biossorção, moringa oleífera, metais tóxicos.

ABSTRACT

Water is an essential component for life for all species. For humans, besides the need for daily ingestion, it is also used for various activities, such as personal hygiene, cleaning, and industrial processes. However, only the non-saline and contaminant-free part of the water can be used for human activities. Among the main agents that pollute water resources, the present work highlights toxic metals. These compounds present high toxicity even at low concentrations, mainly due to their bioaccumulation characteristics. They are not easily degraded into less toxic components and have a long residence time in the water body, posing a risk to human health and ecosystems. Barium is an alkaline earth metal whose toxicity has long been recognized. It is found in small concentrations in natural waters, mainly in the form of barite (BaSO_4). It is not found free in nature, due

to its high reactivity. The main anthropic actions that emit barium into the environment are: well drilling; production of pigments, fireworks, glass, and pesticides; and purification of barite ore with the subsequent disposal of the effluents. In natural waters, barium has an average concentration of 0.01 mg-L⁻¹ due to the low solubility of its salts. The most soluble barium salts are chlorides, nitrates, and carbonates. Barium poisoning can cause nausea, vomiting, diarrhea, loss of reflexes, and muscle paralysis, and can lead to death if there is no treatment. The biosorption of potentially toxic metals has shown to be an alternative in the treatment of contaminated water because it is a low cost and fast technique. Among the biosorbents, *Moringa oleifera* residues stand out because they have a large amount of pores and surface area, indicating a good adsorption capacity for the treatment of surface water and effluents, being an alternative to conventional treatments. The potential of *Moringa oleifera* has been studied in the treatment of contaminated water and effluents through coagulation and adsorption processes. *Moringa* biomass has demonstrated the ability to improve water quality parameters including pH, turbidity, total dissolved solids, fluoride, hardness, and contaminant removal. Therefore, this work proposed to evaluate the efficiency of *Moringa oleifera* biomass in its leaf, pod and seed fractions in the removal of barium in water. Adsorption assays were performed according to experimental planning, for the evaluation of the following variables: type (leaf and pod and seed), biomass amount (0.32g to 1.68g), biomass particle diameter (particles smaller than 425 µm, particles between 425 µm and 600 µm, between 600 µm and 1180 µm, between 1180 µm and 1750 µm and larger than 1750 µm) and different initial barium concentrations (6.40 to 33.45 mg-L⁻¹). *Moringa* leaves showed 98.6% Ba²⁺ removal, *moringa* pods 98.2%, and *moringa* seeds showed 99.8% Ba²⁺ removal. Since the seed was the sample that showed the best removal percentage in the experimental planning, it was analyzed according to Freundlich and Langmuir adsorption isotherm models at three temperatures (25°C, 35°C, and 45°C). Based on the correlation coefficients (R²), the model that showed the best fit to the experimental data of barium biosorption by the seeds was the Freundlich model, thus indicating a biosorption process that can occur in multilayer. The study of adsorption kinetics was also performed using the *moringa* seed and the test data did not fit the pseudo-first-order kinetic model. The best fit was observed by applying the pseudo-second order model. It is concluded that the results demonstrate that *Moringa oleifera* leaves, pods and seeds are efficient biomasses for barium adsorption.

Keywords: biosorption, *moringa oleifera*, toxic metals.

1 INTRODUÇÃO

A ação antrópica produz rejeitos que acabam contaminando a água, sendo esse descarte de forma intencional ou não. A intensificação dessas ações ocorrida após a revolução industrial, tem provocado a contaminação com metais potencialmente tóxicos. Esta contaminação pode prejudicar a qualidade das águas e a saúde humana, além de gerar impactos ambientais. É principalmente através do consumo de águas com metais tóxicos que ocorre a contaminação dos seres humanos e dos animais (AMIN et al., 2013; SILVA et al., 2018.) Essa contaminação pode se dar de forma direta pelo consumo de água e de

forma indireta por meio das cadeias alimentares, devido à grande capacidade de bioacumulação ou magnificação trófica desses elementos. Outro aspecto preocupante é o fato dos metais tóxicos não serem facilmente degradados em componentes menos tóxicos, além disso, possuem um elevado tempo de permanência no corpo d'água. Essas características fazem com que esses compostos permaneçam em ciclos biogeoquímicos no ecossistema aquático por longos períodos (FURTADO, 2018). O bário é um metal alcalino terroso cuja toxicidade é reconhecida há bastante tempo. Ele ocorre em pequenas concentrações nas águas naturais, principalmente sob a forma de barita (BaSO_4). Ações antrópicas como a perfuração de poços, produção de pigmentos, fogos de artifício, vidros e defensivos agrícolas e purificação do minério barita podem emitir bário. Nas águas naturais o bário apresenta concentração média de $0,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ devido à baixa solubilidade de seus sais. Os sais de bário mais solúveis são os cloretos, os nitratos e os carbonatos (FREDDO FILHO, 2018).

A adsorção por biomassas, sendo esse processo chamado de biossorção é um método alternativo de baixo custo para remoção de contaminante, possível de ser aplicada em efluentes líquidos de grande volume.

O estudo da estrutura química dos biossorbentes é de suma importância para a compreensão da biossorção, devido a dependência de alguns parâmetros no seu emprego, tais como pH, o tipo de íon metálico, sua concentração, a temperatura, volume, pressão entre outros fatores (GRAZZIOTTI et al., 2001; LAKSHMARAJ et al., 2009).

Araújo (2018) em seu trabalho demonstrou por meio de microscopia eletrônica de varredura, que a biomassa de *Moringa oleifera* possui enorme quantidade de poros e grande área específica, indicando boa capacidade de adsorção.

A moringa é uma árvore de tamanho médio, originária da Índia, mas difundida em muitos países. Tem sido muito utilizada para fins alimentícios, medicinais, preparação de cosméticos e tratamento de água e efluentes. O potencial da *Moringa oleifera* foi estudado no tratamento de água e efluentes contaminados por meio de processos de coagulação e adsorção, melhorando os parâmetros de qualidade da água, incluindo pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos, fluoreto, dureza e contagem de *Escherichia coli* (DALVAND, A., 2016; JAFARI, A., MAHVI, A. H., 2015; PANDEY, P., et al., 2020; SHAMSOLLAHI, H. R., MAHVI, A. H., 2018).

Sendo assim, este trabalho pretende analisar a capacidade adsortiva das sementes, folhas e vagens da moringa, bem como as variáveis deste processo para que essa biomassa

possa ser aplicada com finalidades de biorremediação, tornando-se uma alternativa aos tratamentos convencionais para remoção de bário em água.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas as frações: folhas, vagens e sementes da *Moringa oleifera*. A coleta foi realizada em uma árvore situada em via pública, na cidade de Uberaba/MG. Após a colheita, todas as frações foram separadas manualmente e secas em estufa circulação forçada de ar (Thelga, TE150CD) a 50°C por 48h e armazenadas a vácuo, em local seco, a temperatura ambiente. Segundo Feria Diaz (2018), as sementes da moringa quando armazenadas em ambiente seco e a temperatura ambiente não sofrem alteração na sua eficiência de coagulação em período inferior a quatro anos e meio.

As folhas, vagens e sementes da moringa foram fragmentadas separadamente em moinho de facas (tipo willye – Fortinox FT-50) peneirada e embalada a vácuo para melhor preservação.

Inicialmente foi feita uma análise da influência do pH para se averiguar se deveria ser feita a correção do mesmo nas soluções, uma vez que o pH pode ter grande influência nas taxas de adsorção (COTTET, 2009). Assim, os testes de adsorção foram feitos em diferentes valores de pH 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10 e 12, os quais foram utilizadas soluções de HCl e NaOH para correção.

Utilizou-se o medidor de pH Tecnal, TEC-7 para leitura das amostras.

Após os testes iniciais, optou-se por realizar o Delineamento Composto Central (DCC) que foi gerado pelo software Statistica 7.0. O DCC consistiu em 2³ pontos fatoriais, 6 pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando de 17 experimentos. O planejamento escolhido, baseado nos testes preliminares, tem o propósito de verificar a influência das variáveis independentes na capacidade adsorptiva da biomassa e na remoção de íons metálicos tóxicos da solução estudada. As variáveis independentes do sistema foram: X1 – Diâmetro da partícula; X2 – Quantidade de biomassa; X3 – Concentração de metal tóxico.

Para o preparo das soluções de Ba²⁺ nas concentrações de 6,47 mg·L⁻¹ a 33,53 mg·L⁻¹, foi utilizado o sal BaCl₂·2H₂O (MERCK, 99,98%).

2.1 ENSAIOS DE BIORREMOÇÃO

Após a moagem, as frações foram separadas em granulometrias uniformes através do peneiramento sucessivo em peneiras de malha conhecida, obtendo-se os seguintes

agrupamentos (por variação de granulometria): partículas menores que $425\mu\text{m}$, partículas entre $425\mu\text{m}$ e $600\mu\text{m}$, entre $600\mu\text{m}$ e $1180\mu\text{m}$, entre $1180\mu\text{m}$ e $1750\mu\text{m}$ e maiores que $1750\mu\text{m}$. Uma pequena diferença entre os diâmetros propostos no DCC e os utilizados na execução da metodologia se deve à disponibilidade de aparato técnico. Foram propostas essas faixas de granulometria, pois são semelhantes aos diâmetros que apresentaram melhores respostas em testes de coagulação realizados por Landázuri et al. (2018). Entretanto, nesse trabalho, foi realizado o teste de adsorção, utilizando granulometrias semelhantes, a fim de se comparar os resultados alcançados por diferentes processos de tratamento.

Após preparadas as soluções contendo bário, foram adicionadas a essas soluções, quantidades de biomassa entre 0,32g e 1,68g das frações da moringa separadamente (folhas, vagens e sementes), e também em cada granulometria, conforme planejamento experimental.

Cada amostra contendo a solução de metal e a fração de moringa foi estudada em diferentes condições de tamanho de partículas, quantidade de biomassa e concentração inicial de metal. As suspensões formadas foram agitadas em agitador magnético (Fisatom 752A) por 30 minutos, a aproximadamente 200rpm e, posteriormente filtradas em filtro de papel qualitativo. Após a filtragem, as soluções resultantes foram submetidas a um processo de digestão ácida a 150°C (Bloco Digestor Tecnal Te-008/50-04) por 30 minutos. Em seguida procedeu-se a análise de espectrometria de emissão atômica com plasma induzido por micro-ondas (MP-AES 4200 – Agilent). As análises foram realizadas em triplicata para determinar as concentrações remanescentes do metal analisado.

2.2 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

De forma a obter uma melhor avaliação teórica do processo foram utilizados os modelos de Isotermas de Langmuir e de Freundlich para análise de dados de adsorção deste trabalho.

A amostra que teve melhor resultado de adsorção nos testes do DCC (semente) foi submetida ao processo de adsorção a temperaturas de 25°C , 35°C e 45°C , e nas concentrações iniciais contendo 5, 10, 20, 30 e $50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de bário, utilizando banho termostaticado (TE-2005, Tecnal) para manutenção da temperatura constante durante o processo adsorptivo. Foram mantidas velocidades de agitação (200 rpm), tempo de contato (30min), pH natural próximo a 6, quantidade de biomassa (0,5 g).

2.3 ESTUDOS CINÉTICOS

Os experimentos de cinética foram realizados a uma temperatura constante (25°C), utilizando 2g de biomassa, 200mL de solução de metal de 10mg·L⁻¹ em pH natural, próximo a 6. Os tempos de contato das amostras foram entre 6 e 180 minutos, sendo a cada seis minutos na primeira hora e durante a segunda e a terceira hora, a cada 15 minutos. Nos experimentos realizados com bário foram utilizadas partículas de semente com diâmetro entre 425 e 600µm. A modelagem cinética foi avaliada em relação ao melhor ajuste pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para comparar a influência dos fatores variáveis e determinar qual a melhor condição experimental em termos de adsorção, foi realizada análise dos percentuais de eficiência remoção dos metais e das capacidades de adsorção. Também foram analisados os gráficos de curvas de contorno gerados pelo software Statistica 7.0

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pH inicial (sem correção) da solução de bário foi de 6,57. Os melhores resultados de remoção ficaram entre os valores de pH 6 e 8, fazendo com que não fosse necessário fazer o ajuste de pH das soluções para os testes de adsorção.

3.1 ENSAIOS DE BIOSORÇÃO

Os resultados dos ensaios de biossorção do bário estão apresentados a seguir, seguindo a sequência das frações: folha, vagem e semente. E ao final são discutidos os resultados das isothermas de adsorção e cinética do processo.

3.2 FOLHA

A tabela 1 apresenta os resultados de eficiência de remoção e capacidade de adsorção dos experimentos propostos no DCC utilizando as folhas de *Moringa oleifera* e soluções de bário. Observa-se nesta tabela que a maior eficiência de remoção foi obtida no experimento 14, com 98,6% de remoção de bário e capacidade de adsorção de 1,6488 mg·g⁻¹. Já a maior capacidade de adsorção foi encontrada no experimento 2 com valor de 2,9075 mg·g⁻¹, e que também apresentou uma alta eficiência de remoção (97,9%). Ambos experimentos em maiores concentrações de metal, 33,45 mg·L⁻¹ e 29,70 mg·L⁻¹,

respectivamente. Já a menor eficiência de remoção foi observada no experimento 5, com 55,8% de remoção de bário e capacidade de adsorção de $0,5525 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. A menor capacidade de adsorção foi dada no experimento 7, com $0,2392 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ e que apresentou a segunda menor eficiência de remoção, 72,5%. Ambos experimentos foram realizados com concentração inicial de bário a $9,970 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Na figura 1, o gráfico curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas folhas de *Moringa oleifera* demonstra que em maiores concentrações de bário, as folhas da moringa apresentam melhor remoção do metal. E em relação à quantidade de biomassa, os pontos centrais (próximo a 1g), apresentam maiores percentuais de remoção do contaminante. Na figura 2 pode-se observar que quanto menor a concentração inicial de bário e maior o diâmetro de partículas, menor foi a remoção do metal. Nas maiores concentrações iniciais, mesmo em diâmetros maiores, a remoção de bário foi alta.

Tabela 1: Resultados de eficiência de remoção e capacidade de adsorção dos experimentos propostos no DCC, utilizando as folhas de *Moringa oleifera* e soluções de bário.

Exp.	d	Biomassa	C ₀	C _F	Efic. Remoção	q _e
1	425 a 600	0,5	9,90	2,50 ± 0,07	74,7%	0,7400
2	425 a 600	0,5	29,70	0,63 ± 0,03	97,9%	2,9075
3	425 a 600	1,5	9,90	1,63 ± 0,25	83,6%	0,2758
4	425 a 600	1,5	29,70	0,60 ± 0,14	98,0%	0,9700
5	1180 a 1700	0,5	9,90	4,38 ± 0,11	55,8%	0,5525
6	1180 a 1700	0,5	29,70	1,93 ± 0,46	93,5%	2,7775
7	1180 a 1700	1,5	9,90	2,73 ± 0,25	72,5%	0,2392
8	1180 a 1700	1,5	29,70	0,95 ± 0,00	96,8%	0,9583
9	<425	1,0	19,80	0,75 ± 0,64	96,2%	0,9525
10	>1700	1,0	19,80	0,50 ± 0,07	97,5%	0,9650
11	600 a 1180	0,32	19,80	2,70 ± 0,21	86,4%	2,6719
12	600 a 1180	1,68	19,80	1,03 ± 0,18	94,8%	0,5588
13	600 a 1180	1,0	6,40	1,15 ± 0,00	82,0%	0,2625
14	600 a 1180	1,0	33,45	0,48 ± 0,11	98,6%	1,6488
15	600 a 1180	1,0	19,80	1,45 ± 0,21	92,7%	0,9175
16	600 a 1180	1,0	19,80	1,15 ± 0,14	94,2%	0,9325
17	600 a 1180	1,0	19,80	1,45 ± 0,00	92,7%	0,9175

Nota: Exp.: Experimento. d: Diâmetro de Partícula (µm). B: Biomassa (g). C₀: Concentração inicial de bário ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). C_F: Concentração final média de bário ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Efic. Remoção: Eficiência de remoção (%). q_e: Capacidade de adsorção ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

Figura 1: Curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas folhas de *Moringa oleifera* em função concentração de bário e da quantidade de biomassa.

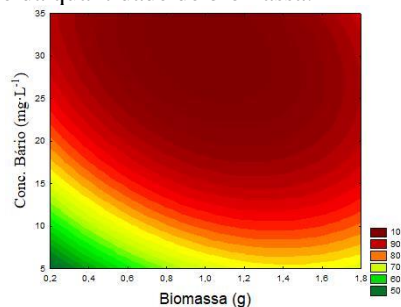
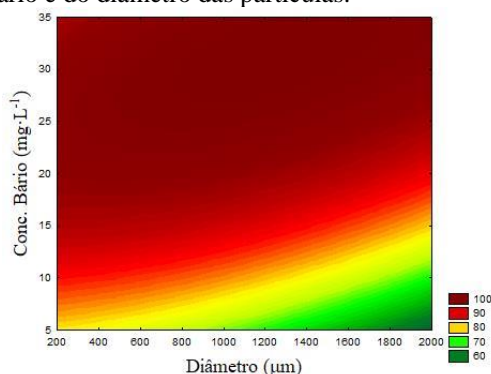


Figura 2: Curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas folhas de *Moringa oleifera* em função concentração de bário e do diâmetro das partículas.



3.3 VAGEM

A tabela 2 demonstra os resultados de eficiência de remoção e capacidade de adsorção dos experimentos propostos no DCC, utilizando as vagens de *Moringa oleifera* e soluções de bário. Observa-se nesta tabela que a maior eficiência de remoção foi obtida no experimento 6, com 98,2% de remoção de bário e capacidade de adsorção de 2,9175mg·g⁻¹. Já a maior capacidade de adsorção foi encontrada no experimento 11, que também apresentou uma alta eficiência de remoção (94,1%). Já a menor eficiência de remoção foi observada no experimento 5, com 77,8% de remoção de bário e capacidade de adsorção de 0,7700mg·g⁻¹. A menor capacidade de adsorção foi dada no experimento 13, com 0,3000 mg·g⁻¹ e que apresentou eficiência de remoção de 93,8%.

Na figura 3, no gráfico curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas vagens de *Moringa oleifera* é possível verificar que em maiores concentrações de bário, as vagens da moringa apresentam melhor remoção do metal, com pequenas quantidades de biomassa, na faixa inferior a 1g. Na figura 4 pode-se observar que quanto menor a concentração inicial de bário e menor o diâmetro de partículas, maior foi a remoção do metal. E nas outras concentrações iniciais, foi difícil verificar uma tendência na remoção do bário em relação ao diâmetro da biomassa.

Tabela 2: Resultados de eficiência de remoção e capacidade de adsorção dos experimentos propostos no DCC, utilizando as vagens de *Moringa oleifera* e soluções de bário.

Exp.	D	Biomassa	C ₀	C _F	Efic. Remoção	q _e
1	425 a 600	0,5	9,90	0,38 ± 0,03	96,2%	0,9525
2	425 a 600	0,5	29,70	1,31 ± 0,27	95,6%	2,8390
3	425 a 600	1,5	9,90	0,63 ± 0,18	93,7%	0,3092
4	425 a 600	1,5	29,70	2,10 ± 0,21	92,9%	0,9200
5	1180 a 1700	0,5	9,90	2,20 ± 0,49	77,8%	0,7700
6	1180 a 1700	0,5	29,70	0,53 ± 0,03	98,2%	2,9175
7	1180 a 1700	1,5	9,90	0,70 ± 0,07	92,9%	0,3067
8	1180 a 1700	1,5	29,70	2,03 ± 0,25	93,2%	0,9225
9	<425	1,0	19,80	1,20 ± 0,42	93,9%	0,9300
10	>1700	1,0	19,80	0,70 ± 0,35	96,5%	0,9550
11	600 a 1180	0,32	19,80	1,18 ± 0,11	94,1%	2,9102
12	600 a 1180	1,68	19,80	1,95 ± 0,28	90,2%	0,5313
13	600 a 1180	1,0	6,40	0,40 ± 0,28	93,8%	0,3000
14	600 a 1180	1,0	33,45	1,23 ± 0,11	96,3%	1,6113
15	600 a 1180	1,0	19,80	1,25 ± 0,07	93,7%	0,9275
16	600 a 1180	1,0	19,80	1,18 ± 0,53	94,1%	0,9313
17	600 a 1180	1,0	19,80	1,33 ± 0,46	93,3%	0,9238

Nota: Exp.: Experimento. d: Diâmetro de Partícula (µm). B: Biomassa (g). C₀: Concentração inicial de bário (mg·L⁻¹). C_F: Concentração final média de bário (mg·L⁻¹). Efic. Remoção: Eficiência de remoção (%). q_e: Capacidade de adsorção (mg·g⁻¹).

Figura 3: Curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas vagens de *Moringa oleifera* em função concentração de bário e da quantidade de biomassa.

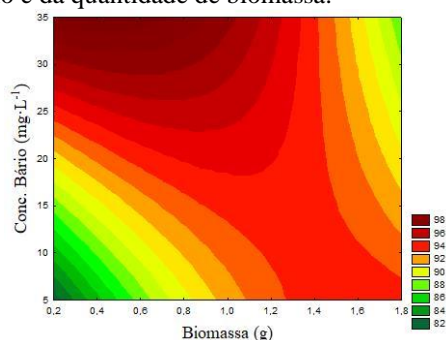
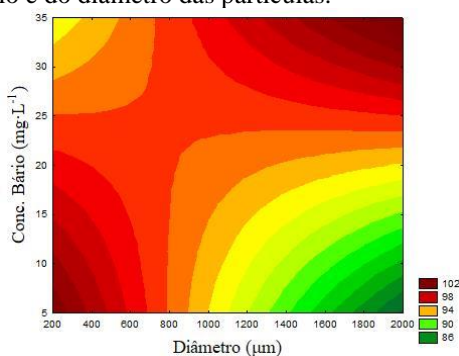


Figura 4: Curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas vagens de *Moringa oleifera* em função concentração de bário e do diâmetro das partículas.



3.4 SEMENTE

Os resultados de eficiência de remoção e capacidade de adsorção dos experimentos propostos no DCC, utilizando as sementes de *Moringa oleifera* e soluções

de bário são apresentados na tabela 3. Observa-se nesta tabela que a maior eficiência de remoção foi obtida no experimento 17, com 98,9% de remoção de bário e capacidade de adsorção de 0,9788 mg·g⁻¹. Já a maior capacidade de adsorção foi encontrada no experimento 2, com q_e = 2,8150 mg·g⁻¹, que também apresentou uma alta eficiência de remoção (94,8%). A menor eficiência de remoção foi observada no experimento 5, com 72,2% de remoção de bário e capacidade de adsorção de 0,7150 mg·g⁻¹. A menor capacidade de adsorção foi dada no experimento 13, com 0,2738 mg·g⁻¹ e que apresentou eficiência de remoção de 85,5%.

Tabela 3: Resultados de eficiência de remoção e capacidade de adsorção dos experimentos propostos no DCC, utilizando as sementes de *Moringa oleifera* e soluções de bário.

Exp.	d	Biomassa	C ₀	C _F	Efic. Remoção	q _e
1	425 a 600	0,5	9,90	1,78 ± 0,32	82,1%	0,8125
2	425 a 600	0,5	29,70	1,55 ± 0,07	94,8%	2,8150
3	425 a 600	1,5	9,90	0,25 ± 0,00	97,5%	0,3217
4	425 a 600	1,5	29,70	0,05 ± 0,00	99,8%	0,9883
5	1180 a 1700	0,5	9,90	2,75 ± 0,07	72,2%	0,7150
6	1180 a 1700	0,5	29,70	3,30 ± 0,28	88,9%	2,6400
7	1180 a 1700	1,5	9,90	0,85 ± 0,00	91,4%	0,3017
8	1180 a 1700	1,5	29,70	0,58 ± 0,39	98,1%	0,9708
9	<425	1,0	19,80	0,15 ± 0,00	99,2%	0,9825
10	>1700	1,0	19,80	4,48 ± 0,67	77,4%	0,7663
11	600 a 1180	0,32	19,80	5,40 ± 0,35	72,7%	2,2500
12	600 a 1180	1,68	19,80	0,45 ± 0,14	97,7%	0,5759
13	600 a 1180	1,0	6,40	0,93 ± 0,46	85,5%	0,2738
14	600 a 1180	1,0	33,45	0,93 ± 0,245	97,2%	1,6263
15	600 a 1180	1,0	19,80	0,38 ± 0,11	98,1%	0,9713
16	600 a 1180	1,0	19,80	0,20 ± 0,07	99,0%	0,9800
17	600 a 1180	1,0	19,80	0,23 ± 0,03	98,9%	0,9788

Nota: Exp.:Experimento. d: Diâmetro de Partícula (µm). B: Biomassa (g). C₀: Concentração inicial de bário (mg·L⁻¹). C_F: Concentração final média de bário (mg·L⁻¹). Efic. Remoção: Eficiência de remoção (%). q_e: Capacidade de adsorção (mg·g⁻¹).

Figura 5: Curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas sementes de *Moringa oleifera* em função concentração de bário e da quantidade de biomassa.

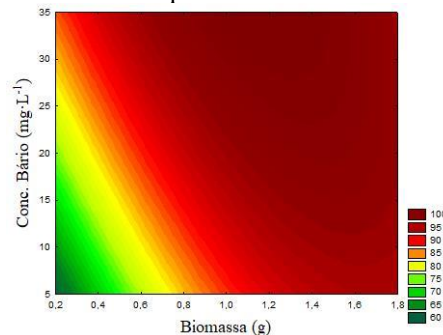
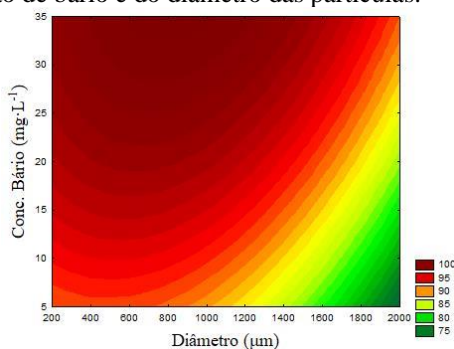


Figura 6: Curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas sementes de *Moringa oleifera* em função concentração de bário e do diâmetro das partículas.



Na figura 5, o gráfico curva de contorno para a resposta eficiência de remoção de bário pelas sementes de *Moringa oleifera* demonstra que em relação à quantidade de biomassa, que em maiores quantidades os experimentos apresentam maiores percentuais de remoção do contaminante, sendo encontrados os melhores resultados quando as concentrações iniciais de metal foram maiores. Na figura 6 pode-se observar que quanto menor a concentração inicial de bário e maior o diâmetro de partículas, menor foi a remoção do metal. Analisando os resultados, observa-se que o maior percentual de eficiência de remoção de Ba^{2+} foi encontrado quando utilizado 1,5g de sementes de moringa com diâmetro de 425 a 600 μm e solução com concentração inicial de bário a 10 $mg \cdot L^{-1}$, com 99,8% de remoção do íon. No estudo de Hassan et al. (2020), eles descrevem a remoção de Ba^{2+} e Sr^{2+} de meio aquoso e radionuclídeos radioativos ^{133}Ba e ^{90}Sr de soluções de resíduos radioativos utilizando a raiz de *Salvadora persica* em pó como um biossorvente. Apresentado como eficiência de remoção máxima, 91,3% de bário e 82,6% de estrôncio. Kaveeshwar et al. (2018) utilizaram carvão ativado produzido a partir de cascas de noz-pecã na remoção de Ba^{2+} e Sr^{2+} de águas residuais. Seus resultados mostraram que o modelo de Langmuir melhor se ajustou ao sistema de adsorção. E a biomassa apresentou capacidade adsortiva máxima de 3,33 $mg \cdot g^{-1}$ para Ba^{2+} e 8,8 $mg \cdot g^{-1}$ para Sr^{2+} . A maior capacidade adsortiva para os experimentos realizados com Ba^{2+} no presente estudo foi verificada no experimento 6 utilizando as vagens da moringa, o qual a capacidade foi 2,9133 $mg \cdot g^{-1}$.

3.5 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

O estudo dos testes de biossorção do DCC indicaram como melhores condições para que se tenha maior percentual de remoção, a utilização das sementes da MO na

biossorção de bário. Para análise dos modelos de isothermas foram adotadas essas condições.

Com base nos coeficientes de correlação (R^2), o modelo que mostrou melhor ajuste para os dados experimentais para biossorção do bário pelas sementes de moringa foi o de Freundlich, indicando, portanto, um processo de biossorção que pode ocorrer em multicamada. Para 25°C, o R^2 encontrado no ajuste para Freundlich foi 0,9917; a 35°C, o R^2 foi 0,9842, E para 45°C, $R^2 = 0,9861$. O que está de acordo com Coldebella (2018), que em seu estudo utilizando as sementes de MO, sugere que devido à biomassa de moringa ter uma estrutura heterogênea, o modelo de Freundlich tende a se ajustar melhor. Tavares (2016) concluiu em seu estudo, utilizando o fruto da moringa na biossorção de chumbo, que o modelo de Freundlich se ajustou melhor aos dados experimentais quando foram utilizadas as cascas e sementes, e o modelo de Langmuir se ajustou melhor aos dados para as vagens.

3.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Os resultados dos experimentos da cinética de adsorção do bário demonstraram que o equilíbrio foi alcançado rapidamente, durante os estágios iniciais do tempo de contato. Os dados dos ensaios cinéticos de bário não se ajustaram ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem. Nas figuras 10 e 11 estão demonstrados os gráficos da curva cinética e ajuste do modelo de pseudo-segunda ordem que indicaram melhor ajuste.

Como pode ser observado, os dados experimentais para a biossorção do Ba^{2+} pela semente da MO com diâmetro entre 425 e 600 μ m foram bem descritos pelo modelo de pseudo-segunda ordem, que apresentou o coeficiente de correlação ($> 0,98$) na temperatura avaliada. Além disso, os valores de q_e calculado foram concordantes com os valores de q_e experimental. Na temperatura estudada, a constante de velocidade de pseudo-segunda ordem apresentou o valor de 6,369 $g\ mg^{-1}\ min^{-1}$. O modelo de pseudo-segunda ordem adota que a força motriz de adsorção é a diferença entre a concentração da fase sólida, em qualquer tempo do processo, e a concentração da fase sólida no equilíbrio, sendo a taxa de adsorção global proporcional ao quadrado da força motriz (Fontana, K.B. et al., 2016). Além disso, este considera que a cinética de adsorção é principalmente controlada pela difusão externa, indicando que a resistência a transferência de massa ocorre na camada externa do adsorbente (Fontana, K.B. et al., 2016).

Figura 10: Curva para o modelo cinético pseudo-segunda ordem e pontos experimentais para a adsorção de bário.

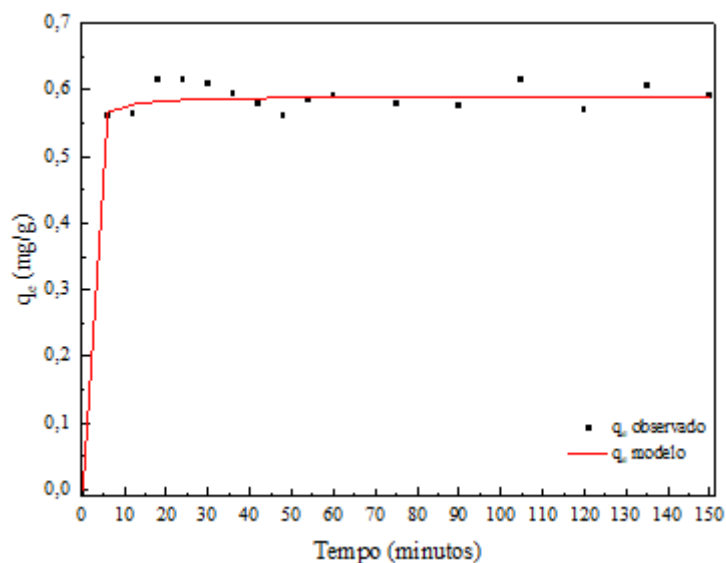
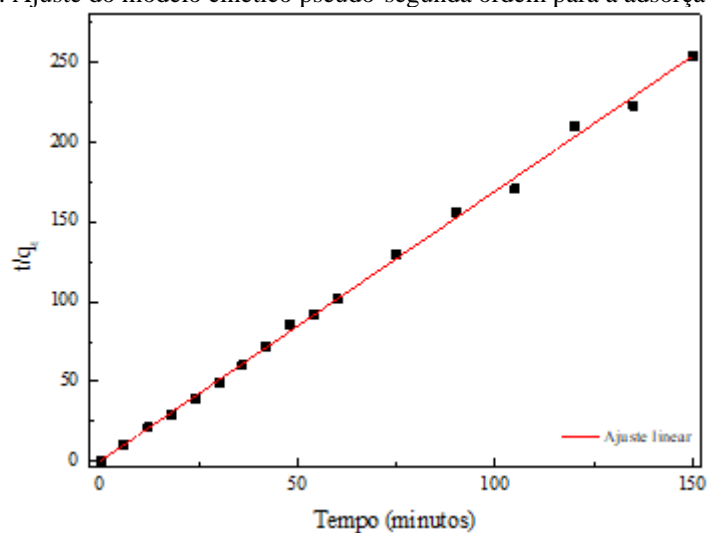


Figura 11: Ajuste do modelo cinético pseudo-segunda ordem para a adsorção de bário.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos testes de biossorção demonstraram maior eficiência de remoção na utilização das sementes da *Moringa oleifera* na biossorção de bário, apresentando 99,8% de remoção de Ba²⁺. As folhas da moringa apresentaram 98,6% de remoção de Ba²⁺, as vagens da moringa 98,2%. A análise dos modelos de isotermas de adsorção de Freundlich e de Langmuir em três temperaturas e demonstrou melhor ajuste ao modelo de Freundlich. O estudo da cinética de adsorção demonstrou melhor ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem. Sendo assim, conclui-se que os resultados demonstram que a *Moringa oleifera* é uma biomassa eficiente na adsorção bário.

AGRADECIMENTOS

Os Autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UFTM), a Universidade Federal do Triângulo Mineiro e à CAPES pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

Amin, N. et al. 2013. Accumulation of heavy metals in edible parts of vegetables irrigated with wastewater and their daily intake to adults and children, District Mardan, Pakistan. *Food Chemistry*, v. 36, n. 2, p. 1515–1523.

Araújo, L. A. et al. 2018. Moringa oleifera biomass residue for the removal of pharmaceuticals from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. vol. 6, p. 7192–7199.

Coldebella, P. F. et al. 2018. Ecofriendly biosorption of atrazine herbicide in aqueous solution by Moringa oleifera Lam: kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Desalination and Water Treatment*. v. 126, p. 248–258.

Cottet, L. et al. 2014. Adsorption characteristics of montmorillonite clay modified with iron oxide with respect to methylene blue in aqueous media. *Applied Clay Science*, v. 95, p. 25-31,

Dalvand, A. et al. 2016. Comparison of Moringa stenopetala seed extract as a clean coagulant with Alum and Moringa stenopetala-Alum hybrid coagulant to remove direct dye from Textile Wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], v. 23, n. 16, p. 16396–16405.

Feria Díaz, J. J. 2018. Influence of Storage Time of Moringa oleifera seed on the coagulant activity efficiency for raw water treatment. *Indian J. Sci. Technol.* v. 11, p. 1-4.

Freddo Filho, V. J. 2018. Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquífero Barreiras: estudo de caso em Benevides – PA. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

Fontana, K.B. et al. 2016. Biossorção de Pb(II) por casca de urucum (Bixa orellana) em soluções aquosas: estudo cinético, equilíbrio e termodinâmico. *Quim. Nova*, vol. 39, n. 9, 1078-1084.

Furtado, L. Q. T. 2018. Desenvolvimento de metodologia analítica utilizando sistema em fluxo e casca de arroz para pré-concentração de chumbo em amostras de sedimento. Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO. Dissertação (Mestrado em Química).

Grazziotti, P. H. et al. 2001. Tolerância de fungos ectomicorrízicos a metais pesados em meio de cultura adicionado de solo contaminado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 839–848.

Hassan, S. S. M. et al. 2020. Removal of barium and strontium from wastewater and radioactive wastes using a green bioadsorbent, *Salvadora persica* (Miswak). *Desalination and Water Treatment*, n. 192, p. 306–314.

Jafari, A.; Mahvi, A. H. 2015. Reactive dyes (r. blue 19 and r. red 120) removal by a natural coagulant: Moringa oleifera. *Environmental Engineering and Management Journal*, [S.l.], v. 14, n. 10, p. 2393-2398.

Kaveeshwar, A. R. et al. 2018. Adsorption properties and mechanism of barium (II) and strontium (II) removal from fracking wastewater using pecan shell based activated carbon. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 193, p. 1–13.

Lakshmaraj, L. et al. 2009. Studies on the biosorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by using boiled mucilaginous seeds of *Ocimum americanum*. *Journal of Hazardous Materials*, v. 169, n. 1-3, p. 1141-1145.

Landázuri, A. C. et al. 2018. Experimental evaluation of crushed *Moringa oleifera* Lam. Seeds and powder waste during coagulation-flocculation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. v. 6, n. 4, p. 5443-5451.

Pandey, P. et al. 2020. Elucidation of the potential of *Moringa oleifera* leaves extract as a novel alternate to the chemical coagulant in water treatment process. *Water Environment Research*, v. 92, n. 7, p. 1051-1056.

Shamsollahi, H. R.; MAHVI, H.; MAHVI, A. H. 2018. Investigation on *Moringa oleifera* extracts function to reduce microbial load in water treatment. *Desalination and Water Treatment*. v. 9, p. 301-307.

Silva, L. S. et al. 2018. Heavy metals in waters used for human consumption and crop irrigation. *Rev. Ambient. Água*, v. 13, n. 4.

Tavares, F. O. et al. 2019. Analysis of the influence of natural adsorbent functionalization (*Moringa oleifera*) for Pb(II) removal from contaminated water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. v. 13318, p. 1-10, 2019.