



GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI – URCA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CCBS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DIVERSIDADE BIOLÓGICA E RECURSOS
NATURAIS - PPGDR

BRENDA DA SILVA VILAR FREITAS

**POTENCIAL DA BIOMASSA DA CASCA DE LIMÃO TAITI (*Citrus latifolia* Tanaka)
NA ADSORÇÃO DE ÍONS Pb^{2+} EM SOLUÇÕES AQUOSAS**

CRATO-CE

2025

BRENDA DA SILVA VILAR FREITAS

**POTENCIAL DA BIOMASSA DA CASCA DE LIMÃO TAITI (*Citrus latifolia* Tanaka)
NA ADSORÇÃO DE ÍONS Pb^{2+} EM SOLUÇÕES AQUOSAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais da Universidade Regional do Cariri-URCA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Diversidade Biológica e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato Pereira Teixeira.

CRATO-CE

2025

(Brenda da Silva Vilar Freitas), _____ autorizo a
reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha Catalográfica elaborada pelo autor através do sistema
de geração automático da Biblioteca Central da Universidade Regional do Cariri - URCA

Freitas, Brenda Da Silva Vilar

F866p POTENCIAL DA BIOMASSA DA CASCA DE LIMÃO TAITI (Citrus latifolia Tanaka) NA ADSORÇÃO DE ÍONS Pb²⁺ EM SOLUÇÕES AQUOSAS / Brenda Da Silva Vilar Freitas. Crato - CE, 2025.

59p. il.

Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais da Universidade Regional do Cariri - URCA.

Orientador(a): Prof. Dr. Raimundo Nonato Pereira Teixeira

1.Adsorção, 2.Resíduos agrícolas, 3.Limão Taiti, 4.Metais pesados; I.Título.

CDD: 577.14

BRENDA DA SILVA VILAR FREITAS

POTENCIAL DA BIOMASSA DA CASCA DE LIMÃO TAITI (*Citrus latifolia* Tanaka)
NA ADSORÇÃO DE ÍONS Pb²⁺ EM SOLUÇÕES AQUOSAS. Dissertação do Mestrado
em Diversidade Biológica e Recursos Naturais apresentada à Universidade Regional do Cariri
– URCA, para obtenção do título de Mestre(a) em Diversidade Biológica e Recursos Naturais.

APROVADO(A) EM: 30 / 07 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Dr(a). (Presidente da banca) – Raimundo Nonato Pereira Teixeira
Orientador(a) Instituição vínculo: Universidade Regional do Cariri - URCA
Assinatura

Prof(a). Dr(a). (Membro Externo da banca) – Fabiola Fernandes Galvão Rodrigues
Instituição vínculo: Universidade Regional do Cariri - URCA
Assinatura

Prof(a). Dr(a). (Membro Interno da banca) – Luiz Marivando Barros
Instituição vínculo: Universidade Regional do Cariri - URCA
Assinatura

Prof(a). Dr(a). (Membro Suplente da banca) – Erlanio Oliveira de Sousa
Instituição vínculo: Instituto Centro de Ensino Tecnológico – CENTEC Faculdade de
Tecnologia – FATEC

Assinatura

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha filha, Ana Mírian, minha força e meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que é o provedor e mantenedor da vida, pude sentir Sua presença e Seu cuidado em cada detalhe. Em todos os momentos, esteve comigo e eu nada seria sem Ti.

À Universidade Regional do Cariri – URCA e ao Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais – PPGDR, pela oportunidade de realizar o mestrado em uma instituição pública e de grande importância.

À FUNCAP pelo financiamento desta pesquisa.

Ao meu orientador, Dr. Raimundo Nonato, pelo apoio, atenção, incentivo e extrema paciência.

Aos membros da banca pelas contribuições tão valiosas e que somarão para o sucesso dessa pesquisa.

À toda equipe do Laboratório de Química Analítica e Ambiental da URCA e a Central Analítica da UFCA, em especial a Roseni Cardoso, Mariana Domingos e José Augusto que me ajudaram muito na realização dos experimentos e ao Jorge Marcell por todo suporte e realização das leituras das amostras. Muito obrigada.

Aos meus pais, Rita e Marcondes, que me incentivam cada dia a ser melhor e são meus maiores exemplos. Obrigada, mainha, por ser essa mulher tão maravilhosa, forte e guerreira, exemplo para mim. Minha inspiração diária. Sempre acreditou em mim e no meu potencial, nunca me deixou desistir. Sem ti, não teria traçado nem metade desse caminho. Painho, obrigada por tudo, todo apoio e, por todas as vezes que, mesmo sem saber o que dizer, me incentivou e acreditou em mim. Minha eterna gratidão aos dois.

Ao meu esposo, Patreze, por todo apoio desde a época em que ainda namorávamos. Amo você. Obrigada por me incentivar a dar sempre o meu melhor, por estar comigo, ser meu parceiro, me apoiar e me dar o meu maior presente: nossa pequena Ana Mírian.

À minha Ana Mírian, por tudo minha filha! Tu és minha força diária, minha felicidade e meu aconchego. Todo esforço é por ti meu amor. Obrigada minha pequena, por tudo. Amo-te infinitamente.

Aos meus sogros, seu Luíz e Gardênia. Posso dizer que são como pais para mim, pois sem vocês não teria conseguido. Sou imensamente grata!

Às minhas irmãs, Bruna e Brícia, por todo apoio e incentivo. Pela dedicação, amor e carinho. Vocês são as melhores, com certeza.

Brenda Luana, Izabele, Renata, Gabriely e Cíntia. Meu sexteto. Obrigada por tudo meninas, vocês foram essenciais nessa jornada. Obrigada pela amizade, parceria e amor de cada uma de vocês.

Enfim, a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, nessa caminhada, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Introdução: A crescente presença de metais pesados no meio ambiente, principalmente devido aos efluentes industriais, representa um sério problema ambiental. O chumbo é um dos elementos mais preocupantes, por estar associado a alterações neurocomportamentais em humanos, sendo especialmente prejudicial em crianças. Entre as alternativas de remediação, destaca-se a adsorção, técnica eficiente para remoção de contaminantes de águas residuais. A biomassa vegetal tem se mostrado promissora nesse processo, especialmente resíduos agroindustriais. A casca do limão Taiti (*Citrus latifolia*), por ser um subproduto abundante e de baixo valor comercial, surge como uma alternativa viável e de baixo custo para remoção de metais pesados. **Objetivo:** Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da casca do limão Taiti (*Citrus latifolia*) como bioissorvente na remoção de íons Pb(II) de soluções aquosas. **Metodologia:** O processo experimental envolveu a aquisição dos frutos em comércio, lavagem, secagem e trituração das cascas de limão Taiti, resultando em um pó fino, o qual foi utilizado em análises de caracterização e experimentos de adsorção. A caracterização do material foi realizada por meio de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Posteriormente, foram conduzidos ensaios de cinética, isotermas e termodinâmica de adsorção, com o intuito de compreender os mecanismos envolvidos na interação entre o bioissorvente e os íons Pb(II) em solução aquosa. **Resultados:** A caracterização por MEV revelou uma morfologia porosa e irregular da casca do limão, além da presença de traços de Pb após o processo de adsorção. A análise por FTIR identificou grupos funcionais como –OH, –CH, –C–O, C=O e C–N, com potencial de ligação a metais pesados. Nos estudos cinéticos, o modelo de pseudo-segunda ordem (PSO) foi o mais adequado, com R^2 ajustado de 0,9998 e tempo de equilíbrio de 60 minutos. As isotermas indicaram melhor ajuste ao modelo de Langmuir em todas as temperaturas. A análise termodinâmica apontou um processo físico e endotérmico ($\Delta H^\circ = 7,28 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), com entropia positiva e ΔG° negativo, caracterizando espontaneidade e aumento da desordem do sistema. **Conclusões:** A casca do limão Taiti mostrou-se um bioissorvente eficiente e viável para remoção de íons Pb(II), destacando-se como alternativa sustentável para o tratamento de efluentes e valorização de resíduos agroindustriais.

Palavras-chave: Adsorção; Resíduos agrícolas; Limão Taiti; Metais pesados.

Agradecimentos: Agradecimento especial à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro.

Apoio:



ABSTRACT

Introduction: The growing presence of heavy metals in the environment, mainly due to industrial effluents, represents a serious environmental problem. Lead is one of the most

worrying elements, as it is associated with neurobehavioral changes in humans, and is especially harmful to children. Among the remediation alternatives, adsorption stands out, an efficient technique for removing contaminants from wastewater. Plant biomass has shown promise in this process, especially agro-industrial waste. The peel of the Tahiti lime (*Citrus latifolia*), being an abundant byproduct with low commercial value, appears to be a viable and low-cost alternative for removing heavy metals. **Objective:** This study aimed to evaluate the efficiency of Tahiti lime peel (*Citrus latifolia*) as a biosorbent in the removal of Pb (II) ions from aqueous solutions. **Methodology:** The experimental process involved the acquisition of commercially available fruits, washing, drying and grinding of the Tahiti lemon peels, resulting in a fine powder, which was used in characterization analyses and adsorption experiments. The material characterization was performed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Subsequently, kinetics, isotherms and adsorption thermodynamics tests were conducted in order to understand the mechanisms involved in the interaction between the biosorbent and Pb (II) ions in aqueous solution. **Results:** SEM characterization revealed a porous and irregular morphology of the lemon peel, in addition to the presence of traces of Pb after the adsorption process. FTIR analysis identified functional groups such as -OH , -CH , -C-O , C=O and C-N , with potential to bind heavy metals. In kinetic studies, the pseudo-second order (PSO) model was the most suitable, with adjusted R^2 of 0.9998 and equilibrium time of 60 minutes. The isotherms indicated a better fit to the Langmuir model at all temperatures. Thermodynamic analysis indicated a physical and endothermic process ($\Delta H^\circ = 7.28 \text{ kJ mol}^{-1}$), with positive entropy and negative ΔG° , characterizing spontaneity and increased disorder in the system. **Conclusions:** Tahiti lemon peel proved to be an efficient and viable biosorbent for the removal of Pb(II) ions, standing out as a sustainable alternative for the treatment of effluents and valorization of agro-industrial waste.

Keywords: Adsorption; Agricultural residues; Tahiti lemon; Heavy metals.

Acknowledgements: Special thanks to the Ceará Foundation for Support to Scientific and Technological Development (FUNCAP), for the financial support.

Support:



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1. Água – Um Recurso Indispensável	14
1.2. Contaminação da Água por Metais Pesados	15
1.3. Chumbo e seus Impactos Ambientais e à Saúde	16
1.4. Adsorção – Alternativa Sustentável para o Tratamento de Água	17
1.5. Uso de Resíduos Agrícolas como Adsorventes	18
1.6. Uso da Casca do Limão Taiti como Biossorvente Alternativo	19
1.7. Objetivos e Estrutura da Dissertação	21
2. MATERIAIS E MÉTODO - MANUSCRITO	26
2.1. Coleta e Preparo do Substrato	26
2.2. Preparo da Solução Padrão	27
2.3. Preparo do Adsorvente para Caracterização	27
2.4. Caracterização do Adsorvente	27
2.4.1. <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	28
2.4.2. <i>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	28
2.5. Estudo da Cinética de Adsorção	28
2.6. Modelos Cinéticos	29
2.7. Isotermas de Adsorção	30
2.8. Estudo da Termodinâmica	30
2.9. Análise de Funções de Erro	31

	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO - MANUSCRITO	31
3. ASPECTOS GERAIS	44
4. CONCLUSÕES GERAIS	46
REFERÊNCIAS	47
ANEXO – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DE ARTIGO CIENTÍFICO	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Limão Taiti, resultado do cruzamento entre o Limão Siciliano e a Lima-da-Pérsia.	20
Figura 2. Corte do limão Taiti, com as partes de sua casca representadas.	21
Figura 3: Fluxograma esquemático da metodologia utilizada.	23
MANUSCRITO - ESTUDO DE ADSORÇÃO DE ÍONS Pb^{2+}...	
Figura 1. Casca do limão Taiti seca, triturada e peneirada.	27
Figura 2. Filtração (1) e acondicionamento (2) das amostras em tubos Falcon para análise de espectrometria de absorção atômica.	28
Figura 3. Espectros de FTIR do pó da casca do limão Taiti antes e depois do processo adsorativo.	32
Figura 4. MEV do pó da casca do limão Taiti antes da adsorção (1) e após a adsorção (2), com escalas de 100,0 e 500,0 μm .	33
Figura 5. Ajuste dos modelos cinéticos de PFO e PSO no estudo da adsorção de íons Pb (II) em solução aquosa utilizando pó de casca do limão Taiti.	34
Figura 6. Distribuição da porcentagem de remoção de Pb^{2+} em função da concentração.	35
Figura 7. Modelos de isothermas de equilíbrio para íons Pb (II) a 283,15, 298,15, 313,15 K (60 min e 150 rpm).	36
Figura 8. Capacidade de adsorção em isothermas de Langmuir em 283, 298, e 313 K.	37
Figura 9. Modelo de Van't Hoff de termodinâmica de adsorção.	38

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1. Adsorventes oriundos de resíduos agroindustriais usados para remoção de metais pesados.	19
MANUSCRITO - ESTUDO DE ADSORÇÃO DE ÍONS Pb^{2+}...	
Quadro 1. Modelos de isoterma de adsorção e suas respectivas equações e parâmetros aplicados aos dados experimentais do adsorvente.	30
Tabela 1. Dados dos modelos cinéticos para o íon Pb^{2+} em casca de limão.	34
Tabela 2. Porcentagem de remoção de Pb^{2+} em função da concentração.	35
Tabela 3. Modelos de isothermas não lineares.	36
Tabela 4. Parâmetros termodinâmicos para adsorção de íons Pb (II) usando pó da casca do limão Taiti.	37

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Pb	Chumbo
C_0	Concentração inicial do adsorvato
C_e	Concentração do adsorvato no equilíbrio
q_e	Capacidade adsortiva no equilíbrio
$q_{\text{máx}}$	Capacidade máxima de adsorção do adsorvente
R^2	Constante de correlação
T	Temperatura
R	Constante universal dos gases
PFO	Pseudo-primeira ordem
PSO	Pseudo-segunda ordem
K_1	Constante cinética de pseudoprimeira ordem ou de Lagergren
K_2	Constante cinética de pseudossegunda ordem ou de Ho
K_L	Constante de Langmuir
K_F	Constante de Freundlich
K_e	Constante de equilíbrio
ΔH°	Variação da entalpia
ΔS°	Variação da entropia
ΔG°	Variação da energia livre de Gibbs
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FTIR	Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier
χ^2	Qui - quadrado
SSE	Soma do Quadrado dos Erros

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Água – Um Recurso Indispensável

A água sempre teve um papel fundamental no mundo, desde geradora de vida à manutenção dos ecossistemas. Ela é essencial para os seres vivos, constituindo a substância predominante no planeta e no organismo humano, tornando-se um recurso vital para todos os seres vivos, inclusive os seres humanos. No homem, representa 60% do seu peso; nas plantas, atinge até 90% e em determinados seres aquáticos chega à 98% (BASSOI, 2014; FERREIRA, 2021).

Sendo a substância mais abundante no planeta, a água está distribuída na forma de três estados físicos: sólido, líquido e vapor, nos oceanos, rios e lagos, nas calotas polares e geleiras, no ar e no subsolo. A água dos oceanos representa em torno de 96% do total disponível na terra, somado as águas salgadas subterrâneas e a de lagos, totalizam 98% de água salgada, indisponível para uso direto a princípio. Apenas os 2% restantes é de água doce, e destes, 70% estão nas geleiras e na atmosfera, restando somente 30% nas águas subterrâneas e águas superficiais (DOS REIS; SANCHES; MALDONADO, 2021).

A água é utilizada para inúmeros fins, como uso doméstico, consumos industriais, consumos agrícolas e atividades recreativas e desportivas. Contudo, a distribuição dos potenciais de água doce não ocorre de modo uniforme. A desigualdade na distribuição dos recursos hídricos acaba contrastando com as diferenças populacionais. A diversificação da sociedade, o aumento populacional e o desenvolvimento cultural contribuem diretamente para que outras necessidades sejam incorporadas em relação ao uso dos recursos hídricos (TUNDISI, 2003; OLIVO; ISHIKI, 2014).

A crise hídrica mundial, está associada, em grande parte, às grandes exigências do setor agrícola para sua produção, pois se trata de um dos principais recursos diretamente ou indiretamente usados para fins econômicos e sociais no agronegócio. Tanto a escassez quanto a contaminação ameaçam o abastecimento e potencializam crises ambientais e sociais (FERREIRA; RIBEIRO, 2022).

Além disso, há, ainda, a questão do desperdício da água, que está associada a falsa ideia de que a água é um recurso natural infinito. A população desperdiça água em seus domicílios, as indústrias e a agricultura usam de maneira inconsciente a água para fins que não exigem água potável, além do descarte inadequado de resíduos (OLIVO; ISHIKI, 2014). Como resultado, ocorre o aumento dos impactos e a variedade de contaminação das águas subterrâneas e das reservas ainda disponíveis.

O uso irracional dos recursos naturais em grande parte do planeta põe em risco o bem essencial à vida humana que é a água. Independentemente de mudanças climáticas globais, muitas regiões do mundo efetivamente vivem hoje em regime de crise hídrica, que tende a se agravar com o crescimento populacional e das atividades produtivas (CIRILO, 2015, p.57).

A cooperação, portanto, é um princípio que deve ser praticado, pois é dever de todos

cuidar da água, especialmente para não prejudicar o futuro da humanidade e, claro, para melhorar as condições presentes.

1.2. Contaminação da Água por Metais Pesados

A industrialização trouxe consigo o crescimento econômico, a geração de empregos e a produção de bens e produtos, contribuindo para o avanço tecnológico em busca de uma melhor qualidade de vida por meio da criação de novos produtos, tornando-os mais compactos, eficientes e resistentes.

Apesar dos benefícios apresentados, o crescimento industrial também promoveu o aumento dos impactos ambientais, nos quais são gerados resíduos sólidos, líquidos e/ou gasosos (FEITOSA *et al.*, 2023). Quando descartados de forma inadequada, esses contaminantes depositados no solo podem ser transportados, lixiviados ou solubilizados pela água pluvial e, assim, contaminar os corpos hídricos (BERNARDINO *et al.*, 2018).

A contaminação por metais pesados vem se intensificando no meio ambiente, principalmente devido aos efluentes industriais, atividades agrícolas, resíduos industriais metalúrgicos, galvanoplásticos, acabamento de metais, fabricação de tintas, de baterias de armazenamento, refino de petróleo e drenagem de minas de minério (SAO, *et al.*, 2017; FEITOSA, *et al.*, 2023).

O termo "metais pesados" é empregado para elementos metálicos com uma densidade superior a 5g/cm^3 , capazes de formar sulfuretos (ADRIANO, 1986). Esses metais representam elementos quimicamente reativos, que podem causar processos de bioacumulação e toxicidade ao organismo, uma vez que este se torna incapaz de eliminar tais substâncias (CRUZ *et al.*, 2021). Devido a sua incapacidade de serem modificados ou destruídos, são utilizados em vários segmentos industriais como as indústrias navais, baterias e pilhas, siderúrgicas, metalúrgicas (GOMES; MELO, 2006; SOUZA; MORASSUTI; DEUS, 2018; MACENA, 2021).

Na classificação de metais pesados estão o chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), ferro (Fe), zinco (Zn), cromo (Cr), arsênio (As), prata (Ag) (GONÇALVES JUNIOR; PESSOA, 2002). Dentre estes metais, alguns são micronutrientes necessários para o crescimento de plantas, tais como zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni) e cobalto (Co), enquanto outros não têm qualquer função biológica conhecida, como cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg) (MARSCHNER 1995; SOUZA; MORASSUTI; DEUS, 2018).

As principais fontes naturais dos metais pesados são: o intemperismo sobre o material crustal, que os liberam nas formas dissolvida e/ou particulada e a atividade vulcânica (80% das concentrações naturais), além da queima de florestas e a atividade biogênica (com 10%, cada uma) (SOUZA *et al.*, 2015). Contudo, as atividades antrópicas têm contribuído para aumentar significativamente a concentração desses elementos no meio, principalmente a indústria química e a mineração, tornando-se uma das formas mais graves de poluição ambiental (CARNEIRO; SIQUEIRA; MOREIRA, 2002; VAITSMAN; VAITSMAN, 2006; MAHAR *et al.*, 2016).

Metais pesados geram grande preocupação ambiental, uma vez que as atividades humanas permitem um maior acúmulo desses metais ocasionando concentrações tóxicas nos

compartimentos aquáticos, terrestres e atmosféricos, podendo causar intoxicação aos organismos expostos (DE ARAÚJO JÚNIOR; PEREIRA, 2021).

Além disso, níveis elevados de metais no solo podem conduzir uma maior absorção pelas plantas, tornando a contaminação destes e dos alimentos uma grande preocupação para o meio ambiente e saúde humana, uma vez que alguns alimentos possuem a capacidade de absorver os metais presentes nos solos contaminados, principalmente através de suas raízes, e de agregar esses compostos a suas folhas, frutos e flores (MAGNA *et al.*, 2013).

Segundo Stark e colaboradores (2021), a toxicidade dos metais está principalmente relacionada à sua capacidade de se ligar a proteínas teciduais e matriz óssea, motivo pelo qual se acumulam no organismo. A maioria deles produz sintomas e distúrbios preocupantes, podendo desencadear doenças como o câncer e até mesmo levarem à morte (NOVAIS, 2025).

O uso de água pela população, então, apresenta-se como potencial ameaça, já que esta utiliza água possivelmente contaminada para cultivo e irrigação de culturas agrícolas, para consumo próprio e dos animais da região (SILVA *et al.*, 2018).

1.3. Chumbo e seus Impactos Ambientais e à Saúde

O chumbo é considerado um dos agentes tóxicos mais antigos e de maior preocupação para o meio ambiente (SILVA *et al.* 2023; FEITOSA *et al.*, 2023). Após a Revolução Industrial, ocorreu um aumento drástico no uso do chumbo, momento em que passou a ser um dos mais importantes metais por apresentar características como boa maleabilidade, baixo ponto de fusão, resistência à corrosão, alta densidade, entre outras (PILON *et al.* 2022). Ele era usado na fabricação de utensílios domésticos como taças, talheres, entre outros, como a correção da acidez do vinho, através da adição de óxido de chumbo, que conferia a bebida um sabor adocicado (SILVA *et al.* 2023).

O chumbo está distribuído de três formas: chumbo metálico, sais de chumbo e chumbo orgânico. Em seu estado puro, o chumbo é raramente encontrado na natureza, pois existe uma quantidade pequena desse metal na crosta terrestre. Quando encontrado, geralmente está na forma de composto mineral (ASSI, *et al.*, 2016; CAIUSCA, 2020).

Segundo o Centro Estadual de Vigilância e Saúde do Rio Grande do Sul, ele está presente na poluição atmosférica graças à queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e às indústrias que empregam a fusão de chumbo em seus processos de fabricação. A contaminação do meio ambiente com chumbo pode decorrer, ainda, de acidentes e da destinação inadequada de resíduos. Essa substância é capaz de persistir no solo e no fundo de rios durante várias décadas.

Atualmente, no Brasil, a resolução N° 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), no art. 16 estabelece que o limite máximo de lançamento do metal Chumbo dissolvido proveniente de qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente, nos corpos d'água é de 0,5 mg. L⁻¹. Visto isso, é necessário que seja observado tanto os padrões de lançamento de efluentes para água de corpos aquáticos superficiais, como também os padrões para qualidade de águas subterrâneas, uma vez que esta apresenta-se de relativa importância tanto regional como nacional.

A produção de baterias e a indústria automotiva são as formas de exposição mais importantes, embora o metal seja empregado em cadeias industriais diversas, como a fabricação de munições, pigmentos, vidros, produtos cerâmicos, ligas metálicas e construção civil (MOREIRA; MOREIRA, 2004; ALVES, 2021). No Brasil, o chumbo é usado na indústria de plástico (PVC), redução de minérios ricos em ouro, lapidação de pedras preciosas, instrução e aprendizado de tiro (BRASIL, 2006).

A maior parte do chumbo entra no organismo pelas vias respiratória e gastrointestinal. Após a absorção, pode ser encontrado no sangue, tecidos moles e tecidos mineralizados (ALVES, 2021). Quando absorvido em alimentos contaminados, distribui-se majoritariamente de três formas: no sangue (99% no plasma, 1%, nas hemácias), no tecido ósseo e nos tecidos moles (fígado, rins, cérebro, pulmões, baço) (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2022).

Segundo Brasil (2022) o chumbo produz efeitos deletérios no sistema nervoso central e periférico, gerando alterações neurocomportamentais relacionadas, tais como: alterações de memória, hiperexcitabilidade, depressão, apatia, insônia, dificuldade de concentração, irritabilidade, hostilidade, fadiga, perda da libido, déficits de inteligência, ataxia, alterações na percepção visual e na coordenação visual-motora, alterações psicomotoras e neuromusculares.

A Organização Mundial da Saúde (2010) afirma que as crianças são as vítimas mais vulneráveis quando expostas ao chumbo devido à alta capacidade de absorção (50% do metal ingerido) quando comparado aos adultos (menos de 10%). Duan e colaboradores (2021) ressaltam que os efeitos neurológicos do chumbo em crianças ocorrem devido a sua alta neurotoxicidade pois além de competir pelos sítios de ligação ao cálcio, também leva a uma perda gradual e persistente de sinais de cálcio no desenvolvimento de neurônios corticais. Afirmam, ainda, que os neurônios são afetados pois o chumbo, quando já absorvido pelo organismo humano, imita a função do cálcio ligando-se seletivamente nos canais de cálcio dependentes de voltagem, resultando em vários efeitos deletérios específicos a longo prazo, tendo como principal efeito infantil, o declínio cognitivo.

1.4. Adsorção – Alternativa Sustentável para o Tratamento de Água

Com o iminente crescimento da poluição ambiental, especialmente dos meios aquáticos, muitas tecnologias têm sido desenvolvidas e utilizadas para o tratamento de água, entretanto, o alto gasto energético e financeiro empregado, apresenta-se como aspecto negativo, já que isso também aumenta o custo de obtenção de água limpa (SOUZA *et al.*, 2015). Com isto, evidencia-se a necessidade de processos e técnicas de tratamento de remoção de substâncias tóxicas de águas e efluentes que sejam eficientes e economicamente viáveis (VIEIRA; BRAGA; JESUS, 2014).

Um método amplamente utilizado para a retirada de contaminantes de soluções aquosas é a adsorção em materiais adsorventes, ou seja, a utilização de um material capaz de reter íons ou moléculas dos contaminantes em sua superfície. A adsorção é empregada para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos de águas residuais de forma eficiente. (SANTOS, 2015; CORINGA *et al.*, 2023). Trata-se de uma técnica promissora no tratamento de efluentes, se destacando pela eficiência na remoção de metais presentes em águas contaminadas, por ser

relativamente econômica e ambientalmente sustentável (JIAO; ZHAO; PEI, 2017).

Para Ciola (1981) o processo de adsorção pode ser classificado como um processo químico ou físico devido a presença de diferentes forças de interação. O autor afirma, ainda, que no processo químico predomina a formação de ligações químicas entre adsorvente e adsorvato, modificando a estrutura das moléculas adsorvidas, enquanto no processo físico, o adsorvente e adsorvato se conectam em uma interação mais leve prontamente reversível.

A biossorção caracteriza-se por ser um processo de remoção de poluentes orgânicos, utilizando um material biológico (biossorvente) (RIBAS; SILVA, 2022). É um processo passivo que ocorre por meio de interações físico-químicas entre os grupos funcionais contidos na superfície da biomassa e os íons metálicos. Ele é relativamente rápido e pode ser reversível, envolvendo algumas etapas: adsorção, separação, sólido-líquido e possível regeneração da biomassa e recuperação do metal (PINO, 2005; SANTANA; SANTOS; RESENDE 2020).

O desempenho de um adsorvente em particular é atribuído a diversos fatores, como pH, temperatura, concentração de metal na solução, área superficial do adsorvente, além da capacidade de dessorção do material, que implica na possível recuperação do metal em processo (CECHINEL; SOUZA; SOUZA, 2013; CECHINEL; FELTRIN, 2024).

1.5. Uso de Resíduos Agrícolas como Adsorventes

Os materiais adsorventes (biomassas) são sólidos que possuem estruturas porosas, que quase sempre apresentam um desequilíbrio de cargas elétricas em suas superfícies, o que proporciona a atração do adsorvato (poluente) presente no fluido (COSTA; MELO, 2018).

A busca por adsorventes alternativos faz dos subprodutos agrícolas fortes candidatos a serem aplicados para a adsorção de vários poluentes, incluindo metais pesados (FARIAS *et al.*, 2020). Inúmeros são os resíduos produzidos atualmente, principalmente no setor agroindustrial. Eles vem sendo cada vez mais estudados e valorizados, devido a sua ampla disponibilidade, baixo custo e serem um risco à qualidade do solo e das águas superficiais e subterrâneas, caso não sejam manejados adequadamente (LERMEN *et al.*, 2021).

A produção agrícola mundial gera bilhões de toneladas de resíduos a cada ano. Estes resíduos surgem em todas as fases da produção agrícola: desde a preparação do solo e o cultivo até a colheita e o processamento pós-colheita. O tipo e a quantidade de resíduos variam significativamente com base no tipo de cultura, práticas agrícolas locais e métodos de processamento (PENNACCHI, 2024).

Os resíduos agroindustriais possuem estruturas lignocelulósicas e carbonáceas que proporcionam abundância de grupos funcionais em sua superfície, qualificando-os como alternativa ao carvão ativado comercial (FREITAS *et al.*, 2023). A utilização desses materiais em comparação com adsorventes comerciais oferece diversas vantagens, tais como baixo custo, ampla disponibilidade, são oriundos de fontes renováveis, geração reduzida de resíduos e elevada eficiência na remoção de diversos poluentes, incluindo fármacos, metais, corantes e outras substâncias orgânicas (PIQUET; MARTELLI, 2022).

A utilização da biomassa vegetal para a adsorção de metais pesados é uma linha de pesquisa promissora, uma vez que diferentes tipos de resíduos mostraram alta capacidade de

remoção de íons metálicos presentes em soluções aquosas (SOUZA *et al.*, 2015). A Tabela 1 apresenta diversos adsorventes utilizados para remoção de metais tóxicos, nos quais demonstraram eficiência significativa.

Tabela 1. Adsorventes oriundos de resíduos agroindustriais usados para remoção de metais pesados.

Metal removido	Biomassa utilizada	Referência
Pb (II)	Casca de coco	SILVA <i>et al.</i> , 2018.
Cu (II), Ni (II), Zn (II), Cr (II)	Casca de ovo de galinha	MOREIRA <i>et al.</i> , 2018.
Cu (II), Cd (II), Pb (II), Fe (II)	Casca de vagem de cacau	OBIKE <i>et al.</i> , 2018.
Cu (II)	Palha de café	OLIVEIRA, 2018.
Cu (II)	Casca de laranja	FARIAS <i>et al.</i> , 2020
Ni (II)	Casca de tangerina	MARQUES <i>et al.</i> , 2020.
Cu(II), Pb (II)	Forragem de fava d'anta	SANTANA <i>et al.</i> , 2020.
Pb (II), Ni(II), Fe (II), Cu (II), Al (II), Ba (II)	Casca de banana	SANTANA; SANTOS; RESENDE, 2020.
Pb (II)	Bagaço de cana-de-açúcar	TOLEDO; ALMEIDA; D'AMELIO, 2020.
Cu (II), Zn (II)	Cascas de maracujá, cascas de ovo e palhas e sabugo de milho	GONÇALVES <i>et al.</i> , 2021.
Cu (II), Zn (II)	Folhas de amora	SILVA, 2022.
Fe (II)	Folha de couve	NASCIMENTO, 2022.
Pb (II)	Resíduos de cevada	FEITOSA <i>et al.</i> , 2023.
Pb (II), Cu (II)	Casca de pequi	MENEZES <i>et al.</i> , 2023.
Cd (II), Cu (II)	Casca de <i>Eucalyptus urograndis</i>	GARCIA <i>et al.</i> , 2024.
Pb (II)	Caroço de manga	RAASCH <i>et al.</i> , 2024.
Zn (II)	Cascas de juazeiro	SANTOS <i>et al.</i> , 2022.
Cu (II), Pb (II)	Bagaço de malte	CHAGAS, 2025.
Cu (II)	Fibra de coco	SOUSA, 2025.
Pb (II)	Casca de manga	SOUZA <i>et al.</i> , 2025.

Com a preocupação em descobrir e criar meios alternativos, com a utilização de biomassas, seriam solucionados dois grandes problemas da atualidade: a disposição final inadequada do resíduo e a retirada eficiente de contaminantes do meio (HEGAZI, 2013; SONG *et al.*, 2013; SAMAN *et al.*, 2015).

1.6. Uso da Casca do Limão Taiti (*Citrus latifolia* Tanaka) como Biossorvente Alternativo

O limão Taiti (*Citrus latifolia* Tanaka) não é considerado um limão verdadeiro, mas na realidade, uma lima ácida. O fruto é uma variedade híbrida, resultante do cruzamento do limão

Siciliano com a Lima-da-Pérsia e é conhecido na Europa como Lima Ácida ou Lima Ácida Taiti (Figura 1) (ROSSI e PANDOLFI, 2019). Originário do sudeste asiático, esse cítrico chegou ao Brasil no início do século XX, quando sementes foram importadas do Tahiti, uma ilha da Polinésia Francesa (REDAÇÃO AGRO ESTADÃO, 2025).

Figura 1. Limão Taiti, resultado do cruzamento entre o Limão Siciliano e a Lima-da-Pérsia.



Fonte: FREITAS, 2025.

Os maiores produtores de limão Taiti no mundo são Índia, China, México, Argentina e Brasil, que vem se destacando na produção de frutos de qualidade superior para atender tanto o consumo interno, como à exportação (SIQUEIRA *et al.*, 2009; FAOSTAT, 2021).

O Brasil é o quinto maior produtor mundial de limão e São Paulo é o maior estado produtor do país, com forte crescimento de área e volume nos últimos anos, representando um importante valor comercial (LIMA; LIMA; SANTOS, 2023). Em 2020, a produção alcançou mais de 1,5 milhões de toneladas, com 120 mil toneladas exportadas e um faturamento de 101 milhões de dólares, sendo os países da União Europeia, Reino Unido e Rússia, os principais destinos das exportações (FRUTAS DO BRASIL, 2025).

O limão Taiti se tornou um ingrediente essencial, sendo amplamente utilizado pela população em pratos doces e salgados, sucos, óleos essenciais, temperos de diversos tipos de pratos e de drinks devido ao seu sabor marcante e refrescante. Além disso, também é considerada a fruta que proporciona benefícios à saúde dos consumidores. Seu cultivo se expandiu por todo o território nacional, beneficiado pela sua resistência e capacidade de adaptação (CEAGESP, 2020; BASTOS *et al.*, 2022).

Contudo, a geração de resíduos de limão Taiti no Brasil é um tema relevante devido ao grande volume de produção da fruta no país. A casca, o bagaço e as sementes são os principais resíduos gerados no processamento do limão, e seu descarte inadequado pode gerar impactos ambientais (BORGES; GIRARDI, 2024). O processamento do limão Taiti para a obtenção do suco gera uma quantidade expressiva de resíduos que equivalem, em média, a 49,9% do peso do fruto. Esses resíduos incluem cascas (50 – 55% da massa total da fruta), sementes (20 – 40% da massa total da fruta), bagaço e águas residuais (SURI; SINGH; NEMA, 2022). Esse resíduo contém pectina, vitamina C e fibras, que os tornam matéria-prima para as indústrias alimentícia,

farmacêutica e de rações (SEBRAE, 2016; BRITO *et al.*, 2017).

Apesar disso, visto que metade do seu peso corresponde ao bagaço e à casca, ainda há a geração de muito lixo orgânico, tendo como consequência seu descarte em lixões e aterros sanitários do país (SOUZA *et al.*, 2020; BELTRAN *et al.*, 2020). Sem um fim adequado, tais resíduos representam um enorme desperdício agrícola, mas que com a devida apreciação e potencialização, podem contribuir para a redução do impacto ambiental (SOUZA *et al.*, 2015; CECHINEL; FELTRIN, 2024).

Diante do exposto, como as cascas do limão apresentam um baixo valor comercial e são recursos largamente disponíveis, podem ser consideradas uma alternativa de baixo custo e muito atraente se utilizadas como biossorventes na remoção de metais pesados de soluções aquosas (SOUZA *et al.*, 2015; BELTRAN *et al.*, 2020). Além disso, a casca do limão Taiti é composta por duas partes distintas, o flavedo e o albedo, possuindo características típicas de um material lignocelulósico, com estruturas de hemicelulose, celulose, lignina, glicídeos solúveis, substâncias pécicas, vitaminas e compostos fenólicos, que favorecem a ligação com os metais (Figura 2).

Figura 2. Corte do Limão Taiti, com as partes de sua casca representadas.



Fonte: FREITAS, 2025.

Sendo assim, é imprescindível salientar a relevância desse estudo, visto sua preocupação com o meio ambiente e conservação do mesmo pois, ele poderá contribuir com a utilização de materiais de baixo custo e notória disponibilidade, no tratamento de efluentes contaminados com metais tóxicos, em especial o chumbo (II).

1.7. Objetivos e Estrutura da Dissertação

Considerando o exposto, torna-se importante o estudo de tecnologias alternativas que sejam eficazes e economicamente viáveis, utilizando adsorventes naturais e biodegradáveis,

diminuindo, assim, os impactos ambientais. Assim, neste trabalho foram utilizadas as cascas do limão Taiti como possível adsorvente na remoção do íon metálico chumbo de soluções aquosas, visando o desenvolvimento de tecnologia verde e de baixo custo no tratamento de águas e efluentes. Além disso, também foram utilizadas para responder as seguintes questões: i) O limão Taiti apresenta algum potencial adsorptivo para o íon chumbo (Pb^{2+})? ii) Suas características morfológicas, químicas e físicas têm influência no processo de adsorção? iii) Qual a influência dos seguintes parâmetros sobre a adsorção: tempo de contato, concentração do metal e temperatura? iv) Qual o grau de eficiência de adsorção do metal com o biosorvente em estudo?

Para tanto, esta dissertação foi dividida da seguinte maneira:

- 1 – Introdução Geral;
- 2 – Métodos;
- 3 – MANUSCRITO – Estudo de Adsorção de Íons Pb^{2+} pela Biomassa da Casca de Limão Taiti (*Citrus latifolia* Tanaka).
- 4 – Aspectos Gerais;
- 5 – Conclusões Finais.

2. MÉTODOS

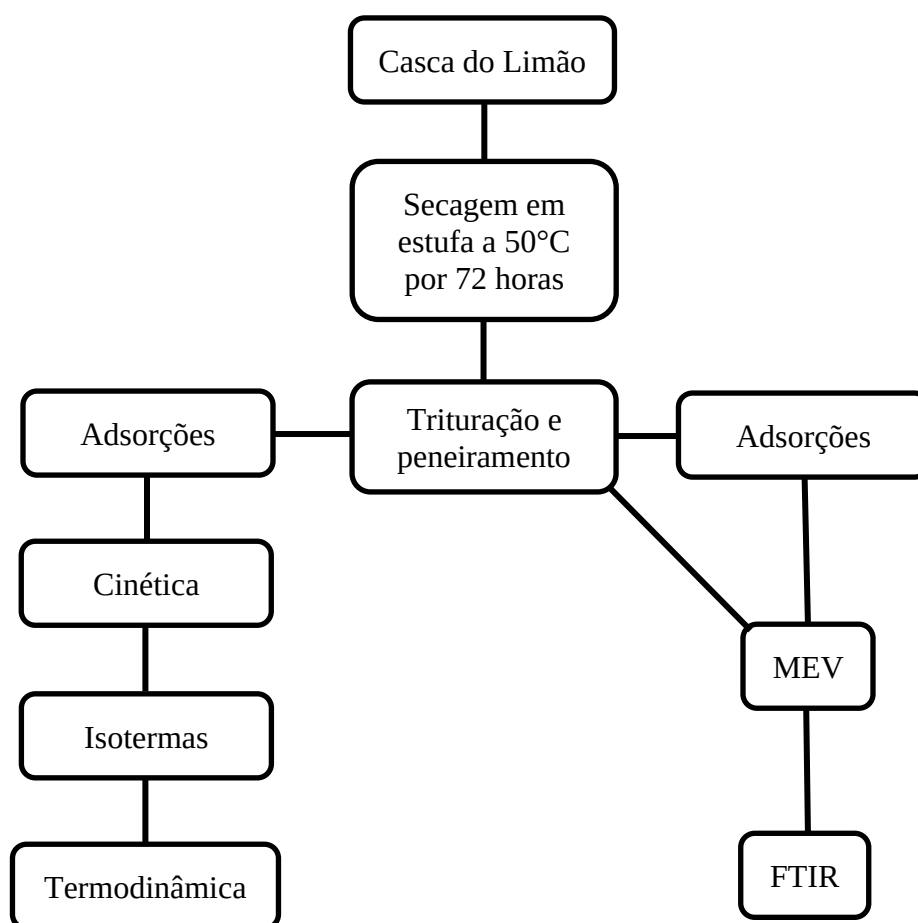


Figura 3. Fluxograma esquemático da metodologia utilizada.

O estudo foi realizado no Laboratório de Química Analítica e Ambiental da Universidade Regional do Cariri – URCA em parceria com a Central Analítica da Universidade Federal do Cariri – UFCA. Foram utilizadas cascas de limões, variedade Taiti (*Citrus latifolia*), a partir de frutos adquiridos no comércio local da cidade de Crato-CE. Eles foram lavados em água corrente e com água destilada e descascados em espirais. Em seguida, o material foi posto para secagem em estufa a 50°C por 72 horas. Após esse processo, as cascas foram trituradas e peneiradas a fim de tornar a amostra mais homogênea. O biossorvente foi caracterizado tanto em sua forma natural, quanto após o contato com a solução de Pb (II), por meio das técnicas analíticas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). Em seguida, foram realizados testes de cinética e isoterma de adsorção, avaliando também os parâmetros termodinâmicos.

Situação: Submetido

ESTUDO DE ADSORSÃO DE ÍONS Pb^{2+} PELA BIOMASSA DA CASCA DE LIMÃO TAITI (*Citrus latifolia* Tanaka)

Brenda da Silva Vilar Freitas¹, Carliane de Oliveira de Souza¹, Victor Feitosa Teixeira¹, Jorge Marcell Coelho Menezes³, Francisco José de Paula Filho⁴, Francisco Rafael Pereira Teixeira, Raimundo Nonato Pereira Teixeira¹

Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais¹, Universidade Regional do Cariri, Crato, Ceará, Brasil; Departamento de Química Biológica², Universidade Regional de Cariri, Crato, Ceará, Brasil; Universidade Federal do Cariri³, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil; Departamento de Física⁴, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Endereços de e-mail: brenda.vilar@urca.br (Brenda da Silva Vilar Freitas); carliane.souza@urca.br (Carliane de Oliveira de Souza); victor.teixeira@urca.br (Victor Feitosa Teixeira); jorge.menezes@ufca.edu.br (Jorge Marcell Coelho Menezes); francisco.filho@ufca.edu.br (Francisco José de Paula Filho); rafael.teixeira@fisica.ufc.br (Francisco Rafael Pereira Teixeira); raimundo.teixeira@urca.br (Raimundo N. Pereira Teixeira).

Revista: Chemistry and Biodiversity, Link: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/16121880>, IF: 2,5 (Qualis A4).

RESUMO

A contaminação por metais tóxicos, especialmente o chumbo, representa um dos principais problemas ambientais atuais devido à sua elevada toxicidade e aos riscos à saúde. A bioadsorção destaca-se como alternativa econômica e de fácil aplicação para a remoção desses contaminantes, sendo os resíduos agroindustriais uma fonte promissora de adsorventes sustentáveis. Este trabalho avaliou a adsorção de íons $Pb(II)$ em soluções aquosas utilizando casca de limão Taiti (*Citrus latifolia* Tanaka). O material foi lavado, seco, triturado e peneirado, totalizando 80 g de amostra em pó. O adsorvente foi caracterizado por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), confirmando a ocorrência de adsorção. Testes de cinética e isotermas indicaram equilíbrio em 60 minutos, ajustando-se ao modelo de pseudo-segunda ordem, com capacidade de adsorção de $10,04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ em 120 min. O modelo de Langmuir apresentou melhor ajuste ($R^2 = 0,9996$), com capacidade máxima de $55,25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ a 283 K. Os parâmetros termodinâmicos revelaram um processo físico, espontâneo, favorável e endotérmico ($\Delta H = 7,28 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\Delta S = 130,51 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Assim, a casca de limão Taiti mostrou-se uma alternativa viável e eficiente para a remoção de $Pb(II)$ em meio aquoso.

Palavras-chave: Limão Taiti, Metais pesados, Adsorção, Tratamento de água.

ABSTRACT

Contamination by toxic metals, especially lead, is one of the main current environmental problems due to its high toxicity and health risks. Bioadsorption stands out as an economical and easy-to-apply alternative for removing these contaminants, with agro-industrial residues being a promising source of sustainable adsorbents. This study evaluated the adsorption of $Pb(II)$ ions in aqueous solutions using Tahiti lime (*Citrus latifolia* Tanaka) peel. The material was

washed, dried, ground, and sieved, totaling 80 g of powdered sample. The adsorbent was characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses, confirming the occurrence of adsorption. Kinetic and isotherm tests indicated equilibrium at 60 minutes, following the pseudo-second-order model, with an adsorption capacity of $10.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ at 120 min. The Langmuir model showed the best fit ($R^2 = 0.9996$), with a maximum adsorption capacity of $55.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ at 283 K. Thermodynamic parameters revealed a physical, spontaneous, favorable, and endothermic process ($\Delta H = 7.28 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\Delta S = 130.51 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Therefore, Tahiti lime peel proved to be a viable and efficient bioadsorbent for the removal of Pb (II) from aqueous solutions.

Keywords: Tahiti Lemon, Heavy Metals, Adsorption, Water Treatment.

Apoio:



1. INTRODUÇÃO

A industrialização trouxe consigo o crescimento econômico, a geração de empregos e a produção de bens e produtos, contribuindo para o avanço tecnológico em busca de uma melhor qualidade de vida por meio da criação de novos produtos, tornando-os mais compactos, eficientes e resistentes.

Em geral, alguns metais advindos de atividades antrópicas proporcionaram melhorias para a vida humana, pois a partir deles é possível a obtenção de matéria-prima para a fabricação, por exemplo, de fertilizantes, baterias e materiais da indústria têxtil. Entretanto, estes elementos, quando em concentrações acima dos níveis aceitáveis pelas regulações vigentes são altamente tóxicos e uma ameaça aos microrganismos, animais, à vida aquática e ao ecossistema como um todo (RIZVI *et al.*, 2020; RAHMAN *et al.*, 2022).

A contaminação de meios aquáticos, especialmente por metais tóxicos, tem chamado a atenção dos órgãos reguladores. Isso se deve ao fato que essas espécies, diferentemente dos contaminantes orgânicos, são bioacumulativos, ou seja, não se degradam, fato que afeta toda a cadeia alimentar (SANTANA, 2018).

O consumo desses compostos, acima do limite, pode causar graves problemas de saúde (SUN *et al.*, 2018; SAHEBJAMEE *et al.*, 2020). Consumir alimentos que estejam contaminados com algum tipo de metal pesado na configuração tóxica pode causar intoxicação crônica uma vez que quando consumidos afetam vários órgãos agindo especificamente nos seus sítios ativos (TAVARES *et al.*, 2020).

Um dos metais tóxicos de maior preocupação para o meio ambiente é o chumbo, que apresenta alto grau toxicológico em praticamente todas as suas composições químicas (FEITOSA *et al.*, 2023). Segundo o Ministério da Saúde Brasileiro (2022), o chumbo é um metal tóxico cumulativo que afeta vários sistemas do corpo sendo particularmente prejudicial para crianças pequenas. Alerta, ainda, que não há nível de exposição ao chumbo que seja conhecido como isento de efeitos nocivos. Seus impactos na saúde afetam, principalmente, os sistemas neurológico, cardiovascular, gastrointestinal e hematológico.

A atualização de 2021 da Organização Mundial da Saúde (OMS) do “Impacto na saúde pública dos produtos químicos: fatores conhecidos e desconhecidos” estima que quase metade

dos 2 milhões de vidas perdidas por exposição a produtos químicos conhecidos em 2019 ocorreram devido à exposição ao chumbo (OMS, 2022).

Diante do exposto, Costa, Furmanski e Domingui (2015), afirmam que o aumento na atenção em relação aos despejos dos efluentes industriais, tanto pelas indústrias e órgãos ambientais como pela sociedade em geral, elevou a quantidade de estudos direcionados a novos possíveis métodos de tratamento. A preocupação ambiental e considerações econômicas são os principais motivos para a utilização de recursos renováveis, tais como os materiais de origem orgânica conhecidos como biomassa de resíduos vegetais.

Grande parte dos resíduos gerados nas agroindústrias como cascas e bagaços é reaproveitada como ração animal e na produção de biocombustíveis, energia, adubos e insumos nas indústrias de alimentos e bebidas (CORINGA *et al.*, 2023). Entretanto, grande parte ainda é descartada sem destinação adequada. O uso da biomassa vegetal surge, então, como uma alternativa mais econômica e eficaz aos tratamentos tradicionais de efluentes, devido a sua alta disponibilidade e acessibilidade, por serem viáveis economicamente e de natureza biodegradável (CECHINEL; FELTRIN, 2024).

Um método para aproveitamento desses resíduos é a sua transformação em produtos adsorventes para descontaminação ambiental, pois são capazes de reduzir contaminantes orgânicos e inorgânicos em solução aquosa pelo processo de adsorção química e/ou física (CORINGA *et al.*, 2023). Esse processo é caracterizado pela transferência de massa da fase fluida para a superfície de um sólido, sendo controlado pelo tipo e natureza do material sólido utilizado como adsorvente (SHAHMIRZADI *et al.*, 2018).

No Brasil, o Limão Taiti (*Citrus latifolia* Tanaka) é uma das espécies cítricas de maior importância comercial e o País encontra-se entre os principais produtores mundiais, estimando-se que sua área plantada ultrapasse, atualmente, 60 mil hectares (COELHO *et al.*, 1998; IBGE – Produção Vegetal, 2023). Contudo, o processamento do limão Taiti para a obtenção do suco gera uma quantidade expressiva de resíduos que equivalem, em média, a 49,9% do peso do fruto (BRITO *et al.*, 2017). Grande parte desses resíduos ainda não tem um fim adequado, o que acarreta a geração de muito lixo orgânico, tendo como consequência seu descarte em lixões e aterros sanitários do país (SOUZA *et al.*, 2020; BELTRAN *et al.*, 2020).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o processo de adsorção do íon chumbo (II) em casca de limão Taiti, visando o seu potencial uso no desenvolvimento de tecnologia verde e de baixo custo de tratamento de águas e efluentes.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Coleta e Preparo da Biomassa

O estudo foi realizado no Laboratório de Química Analítica e Ambiental da Universidade Regional do Cariri – URCA, Crato-CE, em parceria com a Central Analítica da Universidade Federal do Cariri – UFCA em Juazeiro do Norte-CE.

Produziu-se um biossorvente utilizando o exocarpo do limão Taiti (*Citrus latifolia*). Os frutos foram adquiridos no comércio local na cidade de Crato-CE. Foram utilizadas cascas de cerca de 20 frutos, os quais foram lavados em água corrente e com água destilada e descascados manualmente em espirais. Em seguida, as cascas foram dispostas em estufa de esterilização e secagem analógica da marca SolidSteel, modelo SSA-40L a 50°C (323,15 K) por 72 horas, para total secagem da amostra.

Após esse procedimento, o material foi triturado em liquidificador doméstico e, logo em seguida, realizado a granulometria e a separação das frações por meio de peneiras, a fim de diminuir o tamanho das partículas e aumentar a área superficial de contato, tornando a amostra

mais homogênea, e, portanto, mais representativa (BROWN; GALLAGHER, 1998), conforme mostra a Figura 1. Obteve-se aproximadamente, 80g do pó, com tamanho das partículas entre 1.180 e 300 μm , que foi selado em sacos herméticos, e mantidos em ambiente seco.

Figura 1. Casca do limão Taiti, seca, triturada e peneirada.



Fonte: FREITAS, 2025.

2.2. Preparo das Soluções Contendo Pb (II)

As soluções tampão são importantes em muitas aplicações biológicas e químicas, incluindo processos enzimáticos, análises químicas, separação de biomoléculas e sistemas fisiológicos (MANUAL DA QUÍMICA, 2023).

As soluções contendo o íon metálico foram preparadas a partir de nitrato de chumbo (II), $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ P.A-ACS, da empresa Dinâmica Química Contemporânea LTDA, em solução aquosa tamponada ($\text{pH} = 5,5$) obtida a partir de ácido acético e acetato de sódio. Para a realização dos ensaios de estudos cinéticos de adsorção, foi preparada uma solução sintética de íons Pb (II) com concentração de 100 mg.L^{-1} . Para os estudos de isoterma e termodinâmica, foram preparadas soluções com concentrações variando entre 10 e 600 mg.L^{-1} .

2.3. Preparo do Adsorvente para Caracterização

Uma quantidade de aproximadamente 25g do material adsorvente foi submetido a solução de íons Pb (II) na concentração de 100 mg.L^{-1} por 60 minutos sob agitação de 150 rpm. Após este processo o material foi lavado em água destilada para remoção do excesso de solução metálica e seco em estufa por 6 h a 50°C (323,15 K). Para realizar a caracterização do material foram empregadas as técnicas analíticas Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no adsorvente natural e após o contato com a solução de Pb (II).

2.4. Caracterização do Adsorvente

2.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consta em uma avaliação qualitativa da amostra, oferecendo uma imagem da topografia de sua superfície, permitindo uma análise detalhada de sua estrutura. A morfologia da superfície do adsorvente, antes e após o estudo de adsorção, foi realizada no Laboratório de Farmacologia e Química Molecular do departamento de Química Biológica da Universidade Regional do Cariri – URCA, por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura modelo SU3500 da marca Hitachi (Tóquio, Japão). As imagens foram obtidas em baixo vácuo, com pressão na câmara do microscópio de 50 Pa, e distância de trabalho de 5,5 mm, utilizando um detector de elétrons retroespalhados.

2.4.2. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é utilizada para identificar compostos ou investigar a composição de uma amostra. Baseia-se na identificação e interpretação das frequências de vibrações específicas de ligações químicas das substâncias. As análises na Região do infravermelho foram feitas no adsorvente na forma natural e após os ensaios de adsorção. Essa análise foi realizada no Laboratório de Engenharia Ambiental e Sanitária (LEAS), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE – Campus Juazeiro do Norte. A caracterização dos grupos funcionais e das estruturas químicas foram realizadas utilizando um espectrômetro modelo Lysa 7000 da marca Anton Paar, com frequência de 48 varreduras operando na faixa de infravermelho entre 400 cm^{-1} – 4000 cm^{-1} , com resolução espectral máxima de 4 cm^{-1} .

2.5. Estudo da Cinética de Adsorção

O estudo cinético foi executado em triplicata, mediante agitação em banho metabólico de 50 mg do adsorvente em contato com 10 mL da solução, contendo o íon metálico, em Erlenmeyer de 250 mL com concentrações fixas e monoelementares de 100 mg.L^{-1} . A retirada das amostras do banho metabólico ocorreram em intervalos de tempo predeterminados (1, 2, 4, 8, 16, 30, 60 e 120 min). Todas foram submetidas às mesmas condições experimentais: rotação de 150 rpm, pH 5,5 em tampão a 25°C .

Ao final dos ensaios, as soluções foram filtradas em papel de filtro lento, acondicionadas e rotuladas em tubos de Falcon (Figura 2) para a determinação da concentração residual utilizando a técnica analítica de espectrometria de absorção atômica de chama, utilizando um espectrômetro da marca VARIAN, modelo SpectrAA 50b.

Figura 2. Filtração (1) e acondicionamento (2) das amostras em tubos Falcon para análise de espectrometria de absorção atômica.

1

2



Fonte: FREITAS, 2025.

A capacidade de adsorção q_t (mg.g^{-1}) para um determinado tempo (min) foi calculado empregando a Equação 1.

$$q_t = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Onde:

C_o - concentração inicial do metal, mg.L^{-1} ;

C_e - concentração final de metal, mg.L^{-1} ;

m - massa do biossorvente, g; e,

v - volume da solução de metal, L.

2.6. Modelos Cinéticos

A cinética de adsorção caracteriza-se por uma adsorção inicial rápida e uma diminuição considerável na velocidade até o tempo de equilíbrio (VEGA, 2016). Os resultados obtidos nesta etapa foram comparados com os modelos teóricos de pseudoprimeira ordem e pseudo-segunda ordem (modelo de Ho). Uma análise simples da cinética de adsorção realizada pela equação de Lagergren (LAGERGREN, 1898), de pseudoprimeira ordem, baseada na capacidade dos sólidos, é dada pela Equação 2:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

Onde

k_1 : constante da taxa de adsorção de pseudoprimeira ordem (min^{-1});

q_e e q_t : são as quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t , respectivamente (mg.g^{-1}).

O valor de k_1 pode ser determinado pelo gráfico de $\ln(q_e - q_t)$ versus t .

O modelo de pseudossegunda ordem pode ser expresso de acordo com a Equação 3 (HO; MCKAY, 1999):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

Os valores de q_e e k_2 podem ser obtidos pelo intercepto e a inclinação da curva apresentada no gráfico (t/q_t) versus t . Se o modelo cinético de pseudo-segunda ordem for aplicável, a plotagem de (t/q_t) versus t deve apresentar uma relação linear próxima a 1.

2.7. Isotermas de Adsorção

Para os ensaios de isotermas foram preparadas soluções de concentrações com intervalos de 10 a 600 mg.L⁻¹, além de pH constante de 5,5 e rotação de 150 rpm a 25 °C (298,15 K). Esse ensaio também foi realizado nas temperaturas de 10 °C (283,15 K) e 40 °C (313,15 K), respectivamente, para obtenção de parâmetros para o estudo termodinâmico da adsorção. Nas isotermas de adsorção, foram utilizados os modelos de Langmuir e Freundlich, cujas equações e parâmetros estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1. Modelos de isoterma de adsorção e suas respectivas equações e parâmetros aplicados aos dados experimentais do adsorvente.

Modelos isotérmicos	Equações não lineares	Parâmetros
Langmuir (LANGMUIR, 1916).	$q = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	q : quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg.g ⁻¹); q_{max} : capacidade máxima de adsorção (mg.g ⁻¹); K_L : constante de interação entre adsorvato e adsorvente (L.mg ⁻¹); C_e : concentração do adsorvato no equilíbrio (mg.L ⁻¹).
Freundlich (FREUNDLICH, 1906).	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	q_e : quantidade de soluto adsorvido (mg.g ⁻¹); C_e : concentração de equilíbrio em solução (mg.L ⁻¹); $1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície; K_F : constante da isoterma de Freundlich (mg.L ⁻¹) (L.g ⁻¹) ^{1/n} .

Segundo Soares (1998), o modelo de Langmuir assume que a energia de adsorção está em uma superfície homogênea, com uma monocamada de material adsorvente e temperatura constante. A taxa de adsorção deve ser proporcional à concentração do adsorvato em solução e à área superficial do adsorvente livre onde ocorre a adsorção. O modelo proposto por Freundlich considera a superfície heterogênea e adsorção em multicamada, com vários sítios de adsorção possuindo diferentes energias adsorptivas (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

2.8. Estudo da Termodinâmica

Nesse processo, utilizou-se a temperatura em uma determinada faixa (283,15, 298,15 e 313,15 K) para avaliar sua influência. Neste teste, foram utilizados 10 mL da solução contendo o metal, com concentrações variando de 10 a 600 mg.g⁻¹. A quantidade de adsorvente

empregada foi de 50 mg. Para o controle de temperatura, foi utilizada uma incubadora shaker modelo NT-715, da marca Novatecnica. A agitação foi mantida por 60 minutos, a 150 rpm.

Foram explorados os seguintes parâmetros termodinâmicos: constante de equilíbrio (K_e), variação da energia de Gibbs de adsorção (ΔG°), variação da entalpia de adsorção (ΔH°) e variação da entropia de adsorção (ΔS°), que serão determinados pelas Equações 6 e 7:

$$\ln K_e = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (6)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_e \quad (7)$$

Onde:

ΔH° : variação de entalpia;

ΔS° : variação de entropia;

ΔG° : variação da energia livre;

K_e : constante de equilíbrio.

Nascimento e colaboradores (2020), afirmam que os parâmetros termodinâmicos de adsorção permitem:

- Determinar a espontaneidade dos processos;
- Avaliar a rigidez da maioria por contribuições de entalpia ou entropia;
- Estimar a capacidade máxima de adsorção do adsorvente;
- Fornecer informações sobre a heterogeneidade da superfície adsorvente;
- Indicar a natureza do processo (fisissorção ou quimissorção), além de favorecer a compreensão do estudo mecanístico, utilizando aspectos cinéticos.

Vale ressaltar que nesse cálculo levou-se em consideração a unidade adimensional na conversão, sendo K_e° obtido pela equação $K_e^\circ = \ln(K \times M^* \times 10^3 \times 55,5)$, onde M^* é a massa molar do soluto (g.mol^{-1}), obtendo-se, assim, o valor em J.mol^{-1} , conforme preconiza a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), o qual é o valor correto para esse parâmetro (DE LIMA *et al.*, 2020).

2.9. Análise de Funções de Erro

Para determinar o modelo mais favorável de acordo com os dados experimentais, foram obtidas funções estatísticas de análise de erros com o intuito de contribuir para essa escolha, uma vez que consideram as diferenças de resíduos e erros entre valores da capacidade adsorptiva obtidos no experimento (q_{exp}) com aqueles previstos nos modelos (modelo q). Para tanto, foram calculadas as funções R^2 adj., qui-quadrado (χ^2) e soma dos erros quadrados (SSE). A qualificação de um bom ajuste dos modelos cinético e isotérmico considerou a apresentação dos maiores valores de R^2 adj e dos menores valores de χ^2 e SEE. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa Microsoft Excel.

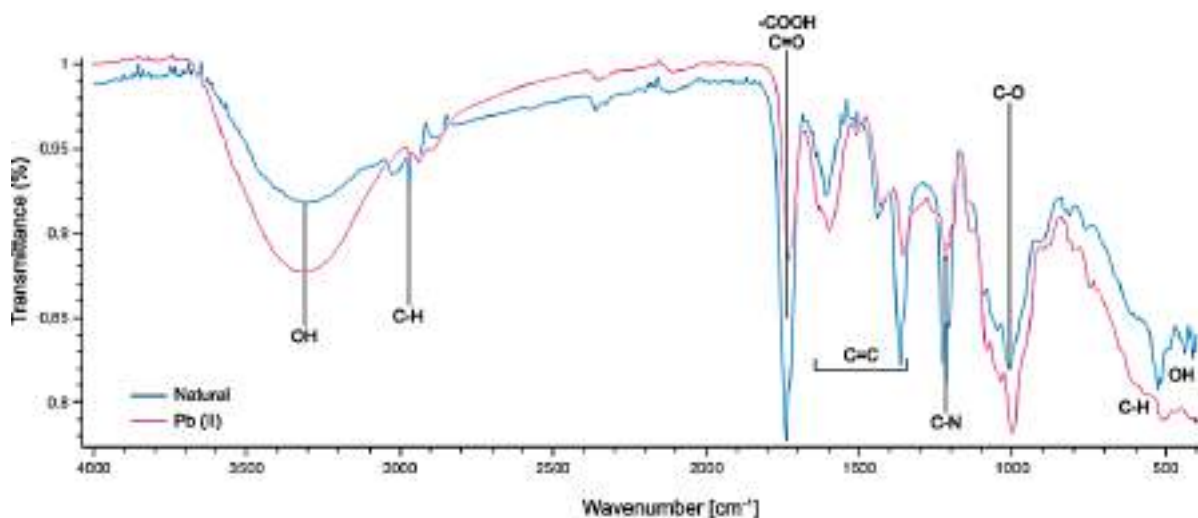
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do Adsorvente

3.1.1. Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A presença de grupos funcionais envolvidos na adsorção foi determinada por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e é mostrada na Figura 3, indicando as bandas de absorção características de um material de natureza lignocelulósica, devido à presença de carboidratos estruturais, lipídios, proteínas, ésteres e compostos aromáticos.

Figura 3. Espectros de FTIR do pó da casca do Limão Taiti antes e depois do processo adsortivo.



O espectro de FTIR do limão revelou uma banda larga e intensa em torno de 3200 – 3400 cm^{-1} , atribuída à vibração de estiramentos OH da celulose, álcoois, compostos fenólicos e substâncias pécicas presentes no material, além de ligações C-H em torno de 2949 cm^{-1} dos grupos $\text{-CH}_2\text{-}$ e -CH_3 de carboidratos, hemicelulose e lignina (GUZMAN *et al.*, 2021; SILVA, 2023). A banda em 1720 cm^{-1} pode ser atribuída ao alongamento do grupo -COOH e C=O de ácidos carboxílicos, indicando que grupos funcionais oxigenados, estão presentes na superfície do material (HOAN *et al.*, 2019; SILVA, 2023). Os picos 1616, 1420 e 1391 cm^{-1} , se devem às vibrações de estiramentos C=C , indicando a formação de poliaromáticos (TEJADA-TOVAR *et al.*, 2021; SANTOS, 2022; MITSUHARA; MORAES; CRESTANI, 2025). Em 1216 cm^{-1} indica a presença de compostos nitrogenados (C-N) na superfície, os quais podem ser atribuídos as estruturas das vitaminas B1 e B2 presentes no limão (SANTOS, 2022). Os sinais em 1093 cm^{-1} e 1033 cm^{-1} correspondem às vibrações de deformação angular das ligações C-O dos álcoois e dos ésteres. Por fim, as bandas em 668 cm^{-1} e 418 cm^{-1} podem ser atribuídas a deformações angulares fora do plano das ligações C-H e -OH de carboidratos em geral (MITSUHARA; MORAES; CRESTANI, 2025).

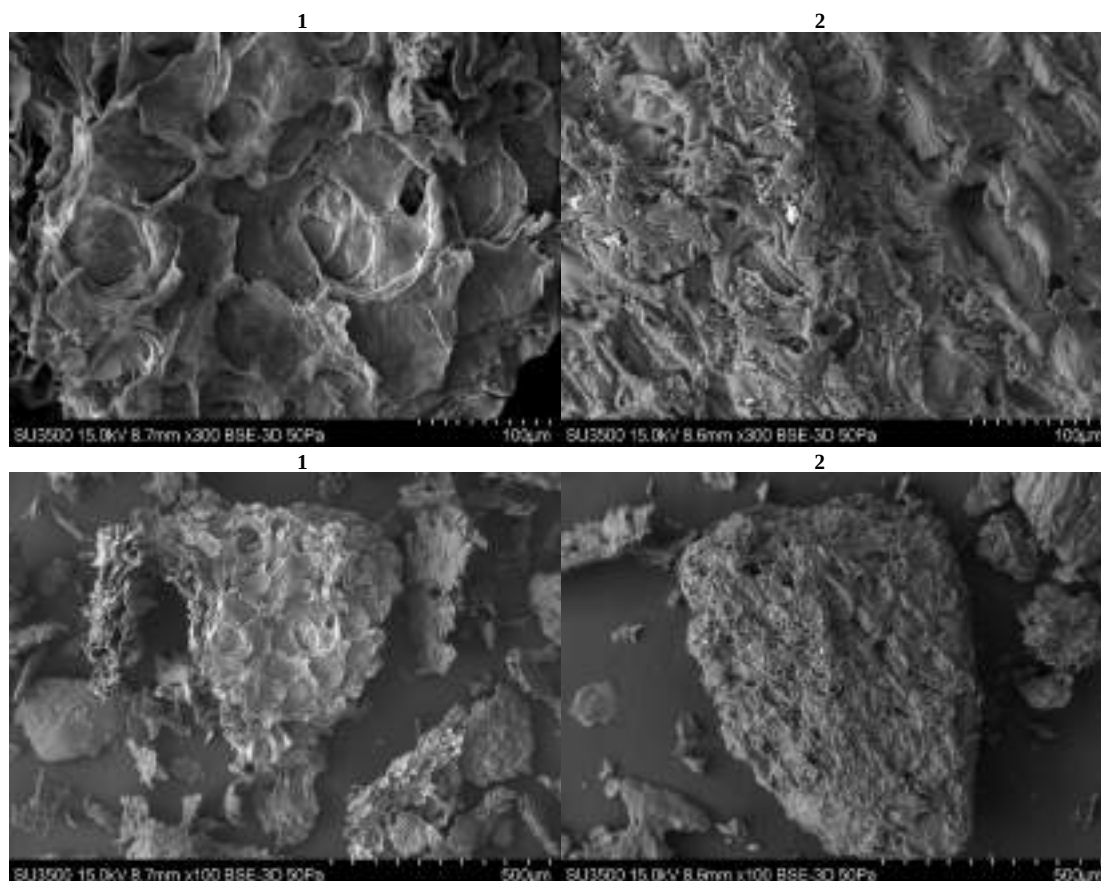
Após a adsorção de Pb (II) , nota-se que não ocorreram alterações significativas na estrutura do material. Contudo, alguns deslocamentos de pico são observados, como em torno de 1712, 1600 e 1339 cm^{-1} , o que pode ser atribuído à ligação dos íons metálicos com os centros ativos identificados, provavelmente devido à formação de ligações metal-carbono, confirmando que houve interação com os íons Pb^{2+} (THIRUMAVALAVAN; LAI; LEE, 2011).

Observa-se no espectro da casca do limão Taiti, uma superfície rica em grupos oxigenados como -OH , -CH , -C-O e C=O , sendo relatado ainda a presença de grupo amina (C-N). Esses grupos são característicos das estruturas de hemicelulose, celulose, lignina, glicídeos solúveis, substâncias pécicas, vitaminas e compostos fenólicos, possuindo a capacidade de se ligar aos metais pesados pela doação de um par de elétrons, formando complexos com os íons metálicos em solução (SOUZA *et al.*, 2015).

3.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A casca do limão Taiti é composta de duas frações distintas: o flavedo ou epicarpo e o albedo ou mesocarpo. A porosidade da biomassa encontra-se na zona de albedo, sendo essa a parte branca e esponjosa, consistindo em células parenquimáticas alargadas com grandes espaços intercelulares (SOUZA *et al.*, 2015), conforme mostrado na microscopia eletrônica apresentada na Figura 4.

Figura 4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do pó da casca do limão Taiti antes da adsorção (1) e após a adsorção (2), com escalas de 100,0 e 500,0 μm .



Na figura acima com aumentos de 100 e 500 X, é possível notar a estrutura porosa e irregular da casca do limão formando camadas sobrepostas, permitindo uma melhor biossorção heterogênea devido à grande interface. Após o contato do biossorvente com a solução contendo o metal (2), nota-se aglomerações de Pb (II) em sua superfície, que podem ser atribuídas à formação de quelatos nas amostras (TEJADA-TOVAR; GONZALEZ-DELGADO; VILLABONA-ORTIZ, 2019). Pode-se observar, também, uma redução na quantidade de poros livres, isso se deve a ocupação dos espaços porosos pela espécie metálica, o que indica que a farinha da casca do limão Taiti, realmente tem bom potencial adsorptivo para o metal pesquisado.

3.2. Cinética de Adsorção

Para os estudos cinéticos, os dados foram modelados utilizando as equações não lineares dos modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem – PFO (modelo de Lagergren) e modelo

cinético de pseudo-segunda ordem – PSO (modelo de Ho).

A cinética de adsorção dos íons Pb(II) atingiu o equilíbrio em, aproximadamente, 60 minutos, alcançando uma capacidade de 9,79 mg.g⁻¹. Até o tempo máximo de estudo (120 min), a taxa de adsorção permaneceu praticamente constante (10,04 mg.g⁻¹), conforme mostrado na Figura 5. Souza (2025) obteve um resultado semelhante ao avaliar o potencial adsorptivo da casca de manga, variação Tommy, onde o tempo de equilíbrio também foi de, aproximadamente, 60 minutos com uma capacidade de adsorção de 9,65 mg.g⁻¹.

Para cada modelo em análise foram determinados parâmetros e constantes, assim como o R² (coeficiente de determinação), que é fundamental para avaliar o ajuste do modelo com os dados. Esse coeficiente, quanto mais próximo de 1, indica uma melhor adequação ao modelo proposto, conforme descritos na Tabela 1.

O modelo que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais foi o de pseudossegunda ordem, com R² ajustado de 0,9998 e baixos valores de SSE e χ^2 , demonstrando um erro menor e um ajuste mais preciso ao modelo. Segundo Duarte-Neto *et al.* (2014) e Feitosa *et al.* (2023), o modelo cinético de pseudo-segunda ordem é baseado na capacidade de adsorção da fase sólida, pois lida com o comportamento do processo em todo o intervalo de tempo de contato, de tempos curtos a longos.

O modelo é baseado na suposição de que a taxa de ocupação dos sítios de bioadsorção é proporcional ao quadrado do número de sítios desocupados (FEITOSA *et al.*, 2023). Isso sugere que há uma troca e compartilhamento de elétrons no sistema adsorvente-adsorvato, proporcionando a melhor correlação dos dados (YAN *et al.*, 2017).

Figura 5. Ajuste dos modelos cinéticos de PFO e PSO no estudo da adsorção de íons Pb (II) em solução aquosa utilizando pó de casca do limão Taiti.

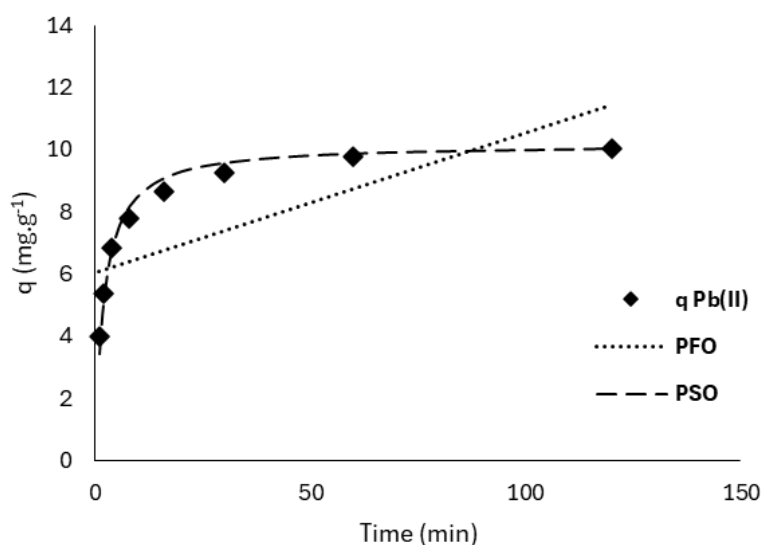


Tabela 1. Dados dos modelos cinéticos para o íon Pb²⁺ em casca de limão.

Pseudoprimeira ordem – modelo de Lagergren				
q _e (mg.g ⁻¹)	R ² ajustado	SSE	χ^2	K ₁ (min ⁻¹)
3,99945	0,9796	17,5184	2,4845	0,0451
Pseudo-segunda ordem – modelo de Ho				
q _e (mg.g ⁻¹)	R ² ajustado	SSE	χ^2	K ₂ (min ⁻¹)
10,19368	0,9998	0,79504	0,14824	0,0438

q_e – capacidade adsorptiva no equilíbrio; R² ajustado – coeficiente de determinação; SSE – soma dos erros quadrados; χ^2 – qui-quadrado, K₁ – constante cinética de pseudoprimeira ordem ou de Lagergren; K₂ – constante cinética de pseudossegunda ordem ou de Ho

Outros estudos apresentaram resultados semelhantes, com bons ajustes ao modelo PSO, utilizando diferentes tipos de cascas como bioissorventes, como cascas de vagem de cacau, com $4,83 \text{ mg.g}^{-1}$ (OBIKE *et al.*, 2018), cascas de pequi, com capacidade de adsorção de $15,6 \text{ mg.g}^{-1}$ (MENEZES *et al.*, 2020), cascas de amendoim, abacaxi e tangerina, com capacidades de $14,1844 \text{ mg.g}^{-1}$, $16,8350 \text{ mg.g}^{-1}$ e $25,1256 \text{ mg.g}^{-1}$, respectivamente (LIMA *et al.*, 2020), cascas de pitaia com $5,91 \text{ mg.g}^{-1}$ (ABATAL *et al.*, 2022) e resíduos de cevada, com $15,1 \text{ mg.g}^{-1}$ (FEITOSA *et al.*, 2023). Em todos esses estudos, o modelo de pseudo-segunda ordem (PSO) apresentou o melhor ajuste.

3.3. Isotermas de Adsorção

A partir do desempenho das isotermas de adsorção em diferentes concentrações, percebeu-se uma diminuição na porcentagem de remoção de Pb^{2+} à medida que a concentração aumentava, conforme mostrado nos dados da Tabela 2 e suas distribuições no gráfico da Figura 6. Isto pode ter ocorrido devido ao esgotamento dos sítios disponíveis.

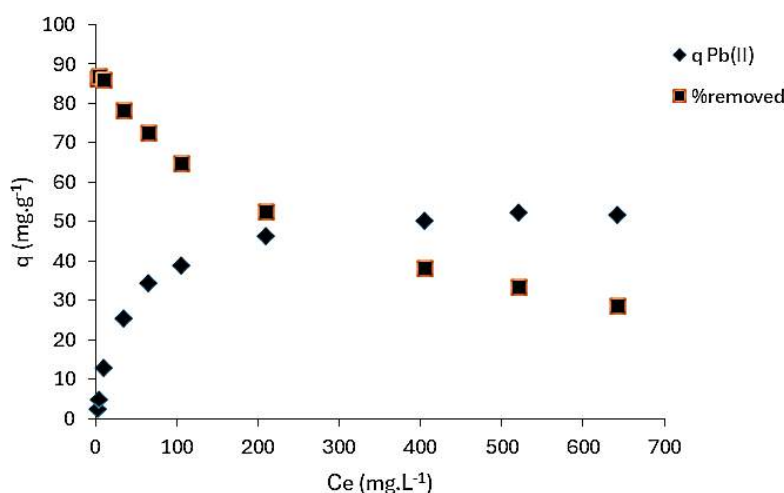
Souza e colaboradores (2020) afirmam que para concentrações elevadas as competições serão maiores, e menores quantidades de adsorção serão obtidas. O mesmo foi visto no processo de adsorção de Pb^{2+} pela casca de tangerina, onde a isoterma cresceu continuamente, até que houve a saturação da biomassa, alcançando a estabilidade de adsorção (LIMA *et al.*, 2020).

Tabela 2. Porcentagem de remoção de Pb^{2+} a 283,15K em função da concentração.

C_0	C_e	q_e	% Remoção
14,7	2	2,54	86,39458
28,7	3,7	5	87,10801
75,1	10,5	12,92	86,01864
161,7	35	25,34	78,35498
237,6	65	34,52	72,64309
301,1	106	39,02	64,79575
440,4	209	46,28	52,54314
656,8	405	50,36	38,33739
782,6	521	52,32	33,42704
900,6	642	51,72	28,71419

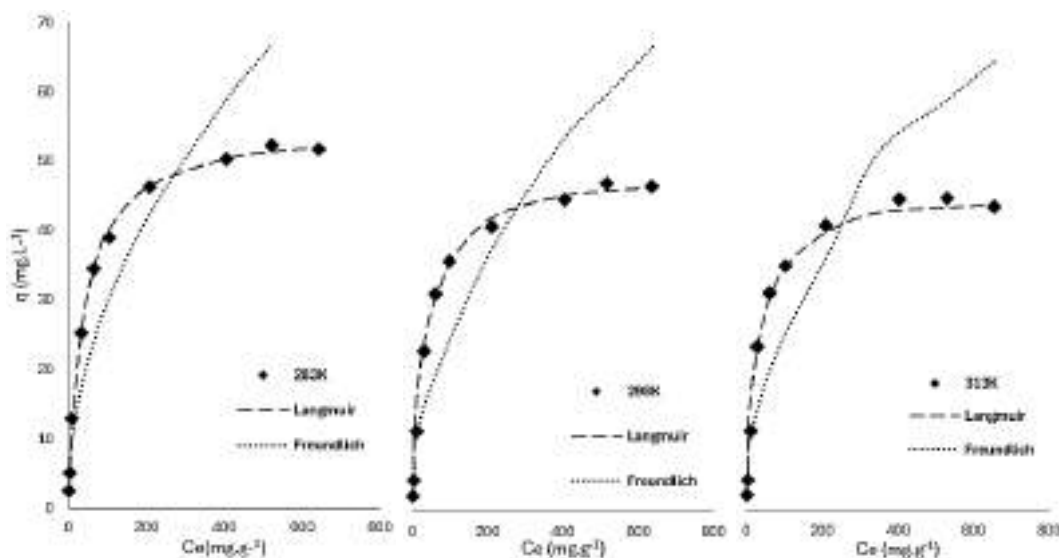
C_0 – concentração inicial do metal; C_e – concentração do metal no equilíbrio; q_e – capacidade adsorptiva no equilíbrio

Figura 6. Distribuição da porcentagem de remoção de Pb^{2+} em função da concentração.



Os modelos de isotermas se ajustaram bem em todas as temperaturas, com valores do coeficiente de determinação bons para os dois modelos de isoterma, contudo os valores experimentais seguiram o modelo de Langmuir, com excelentes valores de R^2 de 0,9996, 0,998 e 0,9962 e baixos valores de SSE e χ^2 para as temperaturas de 283,15, 298,15 e 313,15 K, respectivamente, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7. Modelos de isotermas de equilíbrio para íons Pb (II) a 283,15, 298,15, 313,15 K (60 min e 150 rpm).



Observou-se que as isotermas seguiram um comportamento basicamente constante nas três temperaturas estudadas, não apresentando diferenças bruscas de remoção nas diferentes concentrações do metal, conforme demonstrado pelos valores de $q_{\max}$ de 55,24862 (283,15 K), 54,94505 (298,15 K) e 51,54639 mg.g^{-1} (313,15 K) observados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos de isotermas não lineares.

Modelo de Langmuir			
Parâmetros/Temp. (K)	283,15	298,15	313,15
$q_{\max} (\text{mg.g}^{-1})$	55,24862	54,94505	51,54639
$K_L (\text{L.mg}^{-1})$	0,025368	0,031658	0,034041
R^2 adjusted	0,9996	0,998	0,9962
SSE	4,838048	12,61539	11,63396
χ^2	0,241741	0,664154	0,396745
Modelo de Freundlich			
Parâmetros/Temp. (k)	283,15	298,15	313,15
n	2,01491	2,006421	2,086811
$K_F (\text{mg.g}^{-1}(\text{L.mg}^{-1})^{-1/n})$	2,98645	3,011643	3,259838
R^2 adjusted	0,911	0,8991	0,8948
SSE	1051,29	1184,056	1212,687
χ^2	24,2598	28,12347	29,37777

$q_{\max}$ – capacidade máxima de adsorção do adsorvente; K_L – constante de Langmuir; K_F – constante de Freundlich; R^2 ajustado – coeficiente de determinação; SSE – soma dos erros quadrados; χ^2 – qui-quadrado

Segundo Santos (2020), O coeficiente de determinação (R^2) indica o quanto os pontos obtidos se ajustam a reta, ou seja, valores de R^2 próximos ou iguais a 1 indicam que o modelo adotado descreve bem o processo de adsorção, reforçando que o modelo de Langmuir foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, além de que o modelo obteve os menores valores para as funções de erro χ^2 e SSE. No estudo realizado por Menezes *et al.* (2023), utilizando a casca de pequi como bioissorvente na remoção de Pb^{2+} e Cu^{2+} , foram obtidos resultados semelhantes.

No modelo de Freundlich, é obtido o parâmetro n , importante na análise do processo de adsorção de metais, pois a partir dele é possível saber se a sorção foi favorável ou não, considerando sorção favorável se $n > 1$ e desfavorável caso $n < 1$ (SILVA, 2014). Logo, analisando os valores de n obtidos (Tabela 4), nota-se que a sorção foi favorável, dado que os valores de n são maiores que 1 para o bioissorvente estudado em todas as temperaturas de ativação. O mesmo foi visto com a casca do limão Taiti usado para remoção do corante azul de metileno, onde o valor de $n > 1$ (COSTA; MELO, 2018).

3.4. Termodinâmica de Adsorção

Quando o modelo de Langmuir se ajusta bem aos dados experimentais, a constante de adsorção de Langmuir (a qual se relaciona com a constante de equilíbrio de adsorção) pode ser convenientemente empregada para o cálculo dos parâmetros termodinâmicos (DE LIMA *et al.*, 2020). Portanto, as medidas de adsorção em equilíbrio permitiram a determinação de tais parâmetros, como a constante de equilíbrio termodinâmica (K_e°), a energia livre de Gibbs de adsorção padrão (ΔG°), a entalpia de adsorção padrão (ΔH°) e a entropia de adsorção padrão (ΔS°). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4. A capacidade de adsorção em função da concentração nas três temperaturas analisadas pode ser estudada na Figura 8. Na Figura 9, o comportamento da constante de equilíbrio termodinâmica, obtida pelo modelo de Van't Hoff, foi avaliado em função da temperatura.

Tabela 4. Parâmetros termodinâmicos para adsorção de íons Pb (II) usando pó da casca do limão Taiti.

T (K)	K_e° (J.mol)	ΔG° (J.mol ⁻¹)	ΔH° (J.mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔS° (J.mol ⁻¹ K ⁻¹)
283,15	291720,8	-29623,1	7,281401	130,5132
298,15	364050,7	-31741,4		
313,15	391458,6	-33527,3		

T (K) – temperatura em Kelvin; K_e° – constante de equilíbrio termodinâmica; ΔG° – energia livre de Gibbs; ΔH° – variação da entalpia; ΔS° – variação da entropia

Figura 8. Capacidade de adsorção em isotermas de Langmuir em 283, 298, e 313 K.

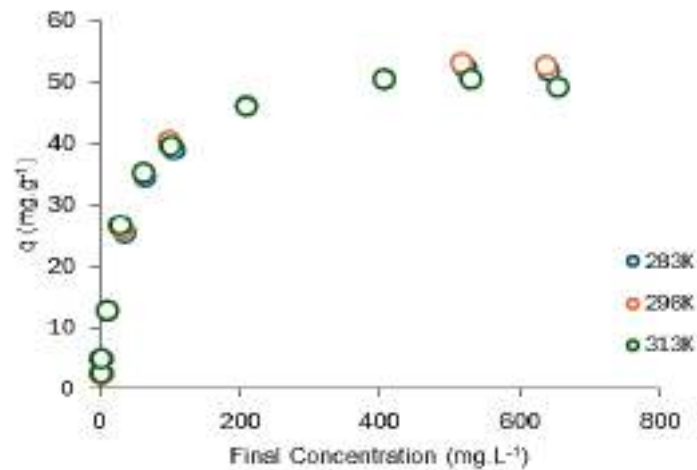
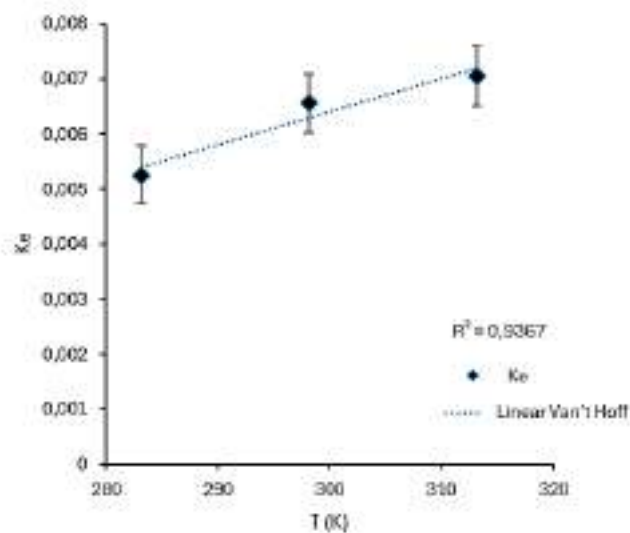


Figura 9. Modelo de Van't Hoff de termodinâmica de adsorção.



O valor de ΔH° foi de $7,2814 \text{ kJ.mol}^{-1}$, que, segundo Nascimento *et al.* (2020), valores de ΔH° entre $2,1$ e $20,9 \text{ kJ.mol}^{-1}$ podem ser indicativos de adsorção física, também chamada de fisissorção. Sendo assim, pode-se concluir que o processo de adsorção é de natureza física. Um estudo realizado por Santos (2015) apresentou comportamentos semelhantes de adsorção dos metais Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} e Al^{2+} , utilizando a casca de laranja como biossorvente. Teixeira (2015) afirma que o processo de adsorção física apresenta:

- Baixo calor de adsorção;
- Interações adsorbato-adsorvente governadas por forças de Van der Waals;
- Processo reversível (moléculas adsorvidas podem ser liberadas sem qualquer alteração em suas estruturas quando desorvidas).

Quando os valores de ΔH° são positivos, o processo é dito endotérmico, enquanto valores negativos caracterizam um processo exotérmico (DEBRASSI; LARGURA; RODRIGUES, 2011). O processo de adsorção física e endotérmica também foi obtido no estudo de Feitosa *et al* (2023), onde foi avaliado o processo de adsorção de íons Pb^{2+} por resíduos de cevada torrada e moída. Observa-se, também, que os valores das constantes de equilíbrio (K°) aumentaram com o aumento da temperatura, confirmando a natureza endotérmica da adsorção.

O valor da entropia foi de $130,5132 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Esse valor positivo de ΔS° indica que a

desordem na interface sólido-líquido aumenta durante o processo de adsorção, sugerindo que o processo seja dirigido pela entropia e não pela entalpia (CARETTA, 2010; POHNDORF *et al.* 2015).

Valores negativos para ΔG° acompanhados de valores positivos para ΔS° indicam que o processo de adsorção é espontâneo e que o adsorvente tem afinidade pelo adsorvato. Em todas as temperaturas avaliadas, os valores de ΔG° foram negativos, indicando que o processo de adsorção de chumbo pela casca do limão Taiti é termodinamicamente viável e espontâneo. Além disso, verifica-se nesse estudo que a variação da energia livre de Gibbs diminuiu com o aumento da temperatura, indicando que o processo de adsorção é favorável em temperaturas mais altas.

4. CONCLUSÃO

A casca do limão Taiti apresentou boa eficiência na remoção de chumbo em solução aquosa. O processo de adsorção foi melhor descrito pelo modelo cinético de pseudo-segunda ordem, enquanto as isotermas ajustaram-se mais adequadamente ao modelo de Langmuir, indicando a formação de monocamada na superfície do adsorvente e elevadas capacidades máximas de adsorção. Os parâmetros termodinâmicos confirmaram que o processo é físico, espontâneo, favorável e endotérmico, relacionado à atração eletrostática. Assim, conclui-se que a casca de limão Taiti constitui um adsorvente de baixo custo e eficiente para a remoção de íons Pb^{2+} em efluentes, conforme comprovado pelos ensaios cinéticos, isotérmicos e termodinâmicos.

REFERÊNCIAS

- ABATAL, M. *et al.* Avaliação de cascas de frutas pitaiaias (*Hylocereus* spp.) para remoção de Pb (II), Cd(II), Co(II) e Ni(II) das águas. **Sustainability** 2022, 14, 1685. <https://doi.org/10.3390/su14031685>.
- BELTRAN, L.B. *et al.* Processo de biossorção de corante utilizando casca de tangerina (*Citrus reticulata*). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, ano2020, v. 6, n. 6, p. 41760-41771, 29 jun. 2020.
- BIREME A./ OPAS / OMS-Márcio. 23 a 29/10 2022 – Semana Internacional de Prevenção Da Intoxicação Por Chumbo | **Biblioteca Virtual Em Saúde MS**. bvsms.saude.gov.br/23-a-29-10-semana-internacional-de-prevencao-da-intoxicacao-por-chumbo/.
- BRITO, K. D. *et al.* Estudo experimental do limão Tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka): composição físico-química e de minerais da polpa in natura e do resíduo albedo. **Revista Principia**, n. 37, p. 64-70, 2017.
- CECHINEL, M. A. P.; FELTRIN, N. Remoção de ferro de soluções aquosas utilizando casca de laranja liofilizada. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 4, p. e4211-e4211, 2024.
- COELHO, Y. da S. *et al.* A cultura do limão-taiti. **Coleção Plantar**, v. 39, 1998.
- CORINGA, E. A. O. *et al.* **Aproveitamento de resíduos de frutas para aplicação como biossorvente de corante em solução aquosa**. XIV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.14.23.XI-017>.
- COSTA, D. M. A.; MELO, J. J. S. Estudo da capacidade de remoção de azul de metileno pela biomassa da casca do limão taiti (*Citrus latifolia*). **Holos Environment**, v. 18, n. 2, p. 271-282, 2018.
- DE COSTA, P. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015.
- DE LIMA, A. C. A. *et al.* Capítulo 4 TERMODINÂMICA DE ADSORÇÃO. **Aspectos teóricos e aplicações ambientais**, p. 88.
- DE OLIVEIRA CARETTA, T. **Avaliação do potencial das cascas de maracujá amarelo e de mexerica como biossorventes de metais pesados**. 2010.
- DEBRASSI, A.; LARGURA, M. C. T.; RODRIGUES, C. A. Adsorção do corante vermelho congo por derivados da O-Carboximetilquitosana hidrofobicamente modificados. **Química nova**, v. 34, n. 5, p. 764-770, 2011.
- DUARTE-NETO, J. F. *et al.* Processos de adsorção de corantes em argilas esmectíticas: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 9, n. 1, p. 51-59, 2014.
- FEITOSA, A. G. *et al.* Evaluation of Pb²⁺ ion adsorption by roasted and grounded barley (*Hordeum vulgare* L.) waste. **Results in Chemistry**, v. 6, p. 101205, 2023.

- FREUNDLICH, H. M. F. Over the adsorption in solution. **J Phys Chem** v. 57, p. 385–470, 1906.
- GUZMAN, M. V. *et al.* Valorização de resíduos de casca de limão como biossorvente para a remoção simultânea de níquel e cádmio de efluentes industriais. **Tecnologia Ambiental e Inovação**, v. 21, p. 101380, 2021.
- HO, Y. S.; MCKAY, G. A kinetic study of dye sorption by biosorbent waste product pith. Resources. **Conservation and Recycling**, v. 25, n. 3-4, p. 171-193, ago./ago. 1999.
- HOAN, B. T., Tam, P. D., & Pham, V.-H. Green Synthesis of Highly Luminescent Carbon Quantum Dots from Lemon Juice. **Journal of Nanotechnology**, 1–9, 2019.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agropecuária** | IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/limao/br>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- LAGERGREN, S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. **Handlingar**, v. 24, n. 4, p. 1-39, 1898.
- LANGMUIR, Irving. The dissociation of hydrogen into atoms. Iii. The mechanism of the reaction. **Journal of the American Chemical Society**, v. 38, n. 6, p. 1145-1156, 1916. <https://doi.org/10.1021/ja02263a001>.
- LIMA, V. E. de *et al.* Avaliação do uso de materiais residuais como adsorventes para remoção de Pb²⁺ em efluentes de laboratórios/ Avaliação do uso de materiais residuais como adsorventes para remoção de Pb²⁺ em efluentes de laboratórios. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, [S. l.], v. 12, pág. 97249–97262, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n12-280. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/21455>. Acesso em: 6 mar. 2025.
- MENDONÇA, L. M. V. L. *et al.* Caracterização da composição química e do rendimento dos resíduos industriais do limão Tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka). **Food Science and Technology**, v. 26, p. 870-874, 2006.
- MITSUHARA, A. T.; MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. Caracterização química do bagaço de laranja: potencial rota para uso desse resíduo. **Revista Principia**, [S. l.], v. 62, 2025. DOI: 10.18265/2447-9187a2022id7678. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/7678>. Acesso em: 29 maio. 2025.
- NASCIMENTO, R. F. *et al.* Adsorção [livro eletrônico]: aspectos teóricos e aplicações ambientais - 2. ed. - **Fortaleza: Imprensa Universitária**, 2020. 4749 Kb: il. color; PDF (Estudos da Pós-Graduação).
- OBIKE, A. I. *et al.* Equilibrium and kinetic studies of Cu (II), Cd (II), Pb (II) and Fe (II) adsorption from aqueous solution using cocoa (*Theobroma cacao*) pod husk. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 22, n. 2, p. 182-190, 2018. DOI:10.4314/jasem.v22i2.5
- RAHMAN, S. U. *et al.* 2022. State-of-the-art OMICS strategies against toxic effects of heavy metals in plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 242: 113952.

RIZVI, A. *et al.* 2020. Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. **Royal Society of Chemistry**, 10: 38379-38403.

SAHEBJAMEE, N. *et al.* Preparation and characterization of porous chitosan-based membrane with enhanced copper ion adsorption performance. **Reactive and functional polymers**, v. 154, 2020.

SANTOS, A. B. dos *et al.* **Síntese e caracterização de carbon dots derivados de resíduos carbonáceos de diferentes cidades de Alagoas para aplicação como sonda fluorescente de Cr (VI)**. 2022.

SANTOS, C. M. Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água. 2015. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais) - **Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”**, Sorocaba. 2015.

SANTOS, M. R. dos. **Avaliação da eficiência dos carvões ativados produzidos a partir da casca da banana nanica (*Musa paradisiaca*) na bioadsorção de íons chumbo em água**. 2020.

SAO, K. *et al.* Remoção bioadsorptiva altamente eficiente de chumbo de efluentes industriais. **Environ Sci Pollut Res.** v. 24, p. 18410–18420, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9413-7>.

SHAHMIRZADI, M. A. A. *et al.* Significance, evolution and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination, water softening and salt removal. **J. Environ. Manage.** v. 215, p. 324–344, 2018. doi:10.1016/j.jenvman.2018.03.040.

SILVA, L. E. **Filme fluorescente a base de carbon dots derivados do extrato de limão aplicado em termometria**. 2023.

SILVA, N. C. R. **Utilização da casca de banana como bioadsorvente para a adsorção de chumbo (II) em solução aquosa**. 2014 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

SOUZA, C. O. de. **Estudo de adsorção dos íons Cu (II) e Pb (II) em meio aquoso utilizando a casca de manga da variedade Tommy atkins**. 2025. 82p. Dissertação (Mestrado em Química Biológica) - Universidade Regional do Cariri - URCA, Crato-CE, 2025.

SOUZA, E. S. *et al.* Utilização da farinha da casca de laranja como bioadsorvente em efluentes têxteis. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 2020, v. 6, n. 8, p. 60101-60109, 21 ago. 2020.

SOUZA, W. D. M *et al.* Potencial da casca da laranja como bioadsorvente alternativo para remoção de metais pesados em águas residuais. **Blucher Chemistry Proceedings**, São Paulo, v. 3, ed. 1, novembro 2015.

SUN, Q. *et al.* Extraction and separation of Fe (III) from heavymetal wastewater using P204 solvent impregnated resin. **Rare Met**, v. 37, p. 894–903, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0729-0>.

TAVARES, J. M. *et al.* Identificação e quantificação de metais pesados nas panelas de barro vitrificadas de fabricação artesanal. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 2, p. 2406-

2414, 2020. ISSN: 2595-6825. Acesso em: 18 fev. 2025.

TEIXEIRA, R. N. P. **Remoção de Cu (II), Ni (II), Cd (II) e Pb (II) de efluentes de indústrias de galvanoplastia usando o sistema híbrido adsorção-eletro-flotação-coagulação**. 2015.

TEJADA-TOVAR, C. *et al.* Adsorption in a binary system of Pb (II) and Ni (II) using lemon peels. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 101, p. 31-44, 2021.

TEJADA-TOVAR, C.; GONZALEZ-DELGADO, A. D.; VILLABONA-ORTIZ, A. Characterization of residual biomasses and its application for the removal of lead ions from aqueous solution. **Applied Sciences**, v. 9, n. 21, p. 4486, 2019.

THIRUMAVALAVAN, M.; LAI, Y-L.; LEE, J-F. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of fruit peels before and after the adsorption of heavy metal ions from aqueous solution. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 56, n. 5, p. 2249-2255, 2011.

VEGA, B. J. J. **Cinética de adsorção de Pb e Cd em solo argiloso laterítico**. 2016. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

YAN, Y. *et al.* Flexible core-shell/bead-like alginate@ PEI with exceptional adsorption capacity, recycling performance toward batch and column sorption of Cr (VI). **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 475-486, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.099>.

3. ASPECTOS GERAIS

Foi visto no presente trabalho que a contaminação do meio ambiente, em especial dos recursos hídricos, por metais pesados, é um grande problema que tem gerado muita preocupação para a sociedade em geral, causando danos ao equilíbrio ambiental e impactando diretamente a saúde pública, principalmente aos menos favorecidos pelos meios básicos de saneamento.

O processo de adsorção é um dos mais utilizados para remoção de íons metálicos em efluentes. Visto isso, foi proposto a utilização da casca do limão Taiti como bioissorvente de baixo custo. Sendo uma amostra de relevância para o estudo por se tratar de um resíduo agroindustrial de fácil obtenção e alta disponibilidade, mas que não possui um destino adequado.

Nascimento e colaboradores (2020) afirmam que os adsorventes usualmente utilizados apresentam larga distribuição de tamanhos de poros no interior das partículas adsorventes e que vários mecanismos de difusão têm lugar a depender do tamanho relativo da molécula de adsorvato em relação ao tamanho do poro. A caracterização pelo MEV mostrou que a superfície irregular e a morfologia porosa da casca do limão facilitam a adsorção de metais em solução aquosa, permitindo uma boa remoção destes nas diferentes partes da casca. Através do FTIR, observou-se características de um material de natureza lignocelulósica, devido à presença de carboidratos estruturais, lipídios, proteínas, ésteres e compostos aromáticos, com a presença de grupos oxigenados como $-OH$, $-CH$, $-C-O$ e $C=O$.

A influência do tempo de contato entre o íon em solução e o adsorvente é de suma importância para a eficiência do processo, sendo alcançado quando o sistema entra em equilíbrio (MARTINS *et al.*, 2014). Sendo assim, os dados cinéticos mostraram que o adsorvente atingiu o equilíbrio de adsorção para o Pb(II) em, aproximadamente, 60 minutos, indicando uma taxa de adsorção relativamente rápida, essencial para aplicações práticas.

O modelo de cinética de pseudo-segunda ordem (PSO) foi o que obteve melhor ajuste aos dados experimentais, indicando que a adsorção dos íons é mais influenciada pela capacidade de adsorção do adsorvente do que pela concentração dos íons em solução. O mesmo foi visto em outros trabalhos utilizando a casca de diversos tipos de frutos como biosorventes, como pequi (MENEZES *et al.*, 2020), amendoim, abacaxi e tangerina (LIMA *et al.*, 2020), por exemplo.

Para as isotermas de adsorção nas temperaturas de 283,15, 298,15 e 313,15K, os dados experimentais foram modelados de acordo com as isotermas de Langmuir e Freundlich, sendo o modelo de Langmuir a apresentar a melhor correlação. Sendo assim, tal modelo foi adotado para explicar o processo adsorptivo para o íon Pb (II), visto que apresentou boas capacidades de adsorção para as três temperaturas estudadas (55,24862; 54,94505 e 51,54639 mg.g⁻¹ em 283,15K, 298,15K e 313,15K, respectivamente), não apresentando diferenças bruscas nos valores de q_{max} .

A partir desses resultados, foi possível determinar os parâmetros termodinâmicos. Observou-se que o processo de adsorção é uma fisissorção, de natureza endotérmica, apresentando uma entalpia (ΔH°) de 7,2814 kJ.mol⁻¹ e uma entropia (ΔS°) de 130,5132 kJ/mol⁻¹, indicando um aumento da desordem na interface sólido-líquido durante o processo de adsorção (POHNDORF *et al.* 2015).

Em todas as temperaturas avaliadas, os valores de ΔG° foram negativos, indicando que

o processo de adsorção é termodinamicamente viável e espontâneo. Apesar das capacidades máximas de adsorção não terem apresentado diferenças significativas, a partir dos parâmetros termodinâmicos, foi possível observar que o processo de adsorção é favorável em temperaturas mais altas, visto que a variação da energia livre de Gibbs diminuiu com o aumento da temperatura.

4. CONCLUSÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstram que a casca de limão Taiti é um biossorvente eficiente para a remoção de íons Pb(II) em soluções aquosas. Sua rápida cinética de adsorção e elevada capacidade máxima reforçam seu potencial como alternativa promissora para o tratamento de águas contaminadas por metais pesados.

Além de contribuir para a mitigação da poluição ambiental, a utilização desse resíduo agroindustrial agrega valor a um subproduto de fácil disponibilidade, fortalecendo a sustentabilidade e a economia nacional.

Por fim, os resultados obtidos abrem perspectivas para pesquisas futuras, envolvendo outros metais pesados ou diferentes condições de adsorção, ampliando o conhecimento e as aplicações dessa biomassa como material adsorvente..

REFERÊNCIAS

- ADRIANO D. C. Trace elements in the terrestrial environment. New York: Springer, 1986.
- ABOAL, A.J.R., CARBALLEIRA, A., GIORDANO, S., ADAMO, P., FERNÁNDEZ, J.A., 2012. Moss bag biomonitoring: a methodological review. **Sci. Total Environ.** n. 432, p. 143–158.
- ALVES, J. I. AVALIAÇÃO PERICIAL NA INTOXICAÇÃO POR CHUMBO. 2021. 24f. Artigo (Especialização em Perícias Médicas). **Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, 2021.
- ASSI, M. A. *et al.* (2016). The detrimental effects of lead on human and animal health. **Veterinary World**, v. 9, n. 6, p. 660-671.10.14202/vetworld.2016.660-671.
- BASSOI, L. H. **Gestão de recursos hídricos na agricultura**. Campinas: Embrapa, 2014.
- BASTOS, D. C. *et al.* **Recomendações para a produção da lima ácida Tahiti em áreas de agricultura de base familiar**. 2022.
- BELTRAN, L.B. *et al.* Processo de biossorção de corante utilizando casca de tangerina (*Citrus reticulata*). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 2020, v. 6, n. 6, p. 41760-41771, 29 jun. 2020.
- BERNARDINO, C. A. R. *et al.* Fitotecnologias: situação atual e perspectivas futuras. **Acta Brasiliensis**, v. 2, n. 2, p. 63, 28 maio 2018.
- BORGES, A. L.; GIRARDI, E. A. **Sistema orgânico de produção de lima-ácida ‘Tahiti’ para a região da Chapada Diamantina, Bahia**. 2024.
- BRASIL. 2022. 23 a 29/10 – Semana Internacional de Prevenção Da Intoxicação Por Chumbo | **Biblioteca Virtual Em Saúde MS**. bvsms.saude.gov.br/23-a-29-10-semana-internacional-de-prevencao-da-intoxicacao-por-chumbo/.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Expostos ao chumbo metálico. Brasília: Série A. **Normas e Manuais Técnicos**, 2006.
- BRITO, K. D. *et al.* Estudo experimental do limão Tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka): composição físico-química e de minerais da polpa in natura e do resíduo albedo. **Revista Principia**, n. 37, p. 64-70, 2017.
- BROWN, M. E; GALLAGHER, P. K. Handbook of thermal analysis and calorimetry. Principles and practice, **Elsevier Science**: Amsterdam, 1998.
- CAIUSCA, A. (2020). **Chumbo**. Educa mais Brasil. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/quimica/chumbo>.
- CARETTA, T. O. **Avaliação do potencial das cascas de maracujá amarelo e de mexerica como biossorventes de metais pesados**. 2010. 64f. Dissertação (Pós-Graduação em Química dos Recursos Naturais) Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.
- CARNEIRO, M. A.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Comportamento de espécies herbáceas em misturas de solo com diferentes graus de contaminação com metais pesados.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, p.1629-1638, 2002.

CEAGESP. (2020). **Conheça mais sobre o limão taiti, o produto da semana**. Disponível em: <https://ceagesp.gov.br/comunicacao/noticias/conheca-mais-sobre-o-limao-taiti-o-produto-da-semana-2101/>. Acesso em: 04 de maio de 2025.

CECHINEL, M. A. P., SOUZA, S. M. A. G. de, SOUZA, A. A. de. Study of lead (II) adsorption onto activated carbon originating from cow bone. **J. Clean. Prod.** 65 (2013) 342–349. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0.084883074657%7B&%7DpartnerID=40%7B&%7Dmd5=e326b9d45767d270f3baaaa1acfac9a7>.

CHAGAS, J. V. da S. Bagaço de malte como biossorvente para remoção de contaminantes hidrofóbicos e metais pesados de efluente. 2025 70 f. Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. **Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais**, Recife, 2025.

Chumbo. Disponível em: <<https://cevs.rs.gov.br/chumbo>>.

CIOLA, R.. **Fundamentos de catálise**. Artigo, [S.L], São Paulo, 1981.

CIRILO, J.A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, n. 106, p. 45- 58, 2015.

CONAMA. Resolução CONAMA 430/2011. **Diário Oficial da União**, p. 9, 2011.

CORINGA, E. A. O. *et al.* APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FRUTAS PARA APLICAÇÃO COMO BIOSORVENTE DE CORANTE EM SOLUÇÃO AQUOSA. **IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**, XIV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Natal-RN, 2023.

COSTA, D. M. A.; MELO, J. J. S. Estudo da capacidade de remoção de azul de metileno pela biomassa da casca do limão taiti (*Citrus latifolia*). **Holos Environment**, v. 18, n. 2, p. 271-282, 2018.

CRUZ, J. V. B. *et al.* Influência dos metais pesados no acometimento do câncer: Uma revisão da literatura. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 6, pág. e45810615992-e45810615992, 2021.

DA SILVA, D. G. *et al.* Exposição ocupacional ao chumbo: uma revisão da literatura. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 12, n. 8, pág. e1212842780-e1212842780, 2023.

DE ARAÚJO JÚNIOR, J. C. M.; PEREIRA, R. Evolução da contaminação por metais pesados em sedimentos em área estuarina Do Rio Capibaribe: Uma revisão. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 38, n. 1, 2021.

DE LIMA, V. E. *et al.* Avaliação do uso de materiais residuais como adsorventes para remoção de Pb²⁺ em efluentes de laboratórios. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 97249-97262, 2020.

DOS REIS, R. A.; SANCHES, M. C.; MALDONADO, A. C. D. Água, fonte da vida/Water, source of life. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 28297-28296, 2021.

DUAN, Y., *et al.* (2021). The Blood Lead Levels of Children and the Loss of Ca^{2+} from Neurons Owing to Lead. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 18, 1205. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212051>.

FAOSTAT. Área colhida, rendimento e produção nos principais países produtores de banana, coco, limão e manga. **Roma**, 2021. Disponível em: <http://faostat.fao.org/>. Acesso em: 10 maio 2025.

FARIAS, C. K. L. *et al.* Adsorção de cobre presente em solução aquosa por adsorvente de casca de laranja seco e modificado com HCL. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, ano 2020, v. 6, n. 12, p. 102344-102355, 28 dez. 2020.

FEITOSA, A. G. *et al.* Evaluation of Pb^{2+} ion adsorption by roasted and grounded barley (*Hordeum vulgare* L.) waste. **Results in Chemistry**, v. 6, p. 101205, 2023.

FERREIRA, A. L. R. **O elogio da água**. 2021. Tese de Doutorado. Faculdade Arquitetura, Universidade Lisboa.

FERREIRA, R. M.; RIBEIRO, S. M. A. Escassez de água no Brasil como consequência do agronegócio. **Século XXI em direito e ciências jurídicas**, p. 90, 2022.

FREITAS, R. A. *et al.* (2023) **62° CBQ - PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ADSORVENTES OBTIDOS A PARTIR DO RESÍDUO AGROINDUSTRIAL CASCA DE AMENDOIM PARA REMOÇÃO DOS FÁRMACOS PARACETAMOL E PROPRANOLOL**. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2023/trabalhos/5/24399-29570.html>. Acesso em: 7 jul. 2025.

FREUNDLICH, H. M. F. (1906) **Over the adsorption in solution**. J Phys Chem 57:385–470.

FRUTAS DO BRASIL. Limão – Frutas do Brasil. **Frutas do Brasil**, 11 nov. 2021. Disponível em: <https://frutasdobrasil.org/pb/fruta/limao/>. Acesso em: 5 mar. 2025.

GARCIA, M. M. A. *et al.* CASCA DE *Eucalyptus urograndis* UTILIZADA COMO BIORSORVENTE PARA REMOÇÃO DE CÁDMIO E COBRE DE SOLUÇÃO AQUOSA. **Geoambiente On-line**, n. 49, 2024.

GOMES, A. C. L.; DE MELO, S. R. Pilhas e efeitos nocivos. **Arquivos do Mundi**, v. 10, n. 3, 2006. ISSN: 1980-959X. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ArqMudi/article/view/19981>. Acesso em 18 fev. 2025.

GONÇALVES JUNIOR, A.C.; PESSOA, A.C.S. Fitodisponibilidade de Cádmio, Chumbo e Crômio, em soja cultivada em argilossolo vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. **Scientia Agrária**, v.3, n.1-2, p.19-23, 2002.

GONÇALVES, M. S. *et al.* USO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COMO BIORSORVENTES NA REMOÇÃO DE METAIS PESADOS DE ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA. In: **Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais**. 2021.

HEGAZI, H. A. Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents. **HBRC Journal**, v. 9, n. 3, p. 276-282, 2013.

HO, Y. S.; MCKAY, G. A kinetic study of dye sorption by biosorbent waste product pith. Resources. **Conservation and Recycling**, v. 25, n. 3-4, p. 171-193, ago./ago. 1999.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agropecuária** | IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/limao/br>. Acesso em: 5 mar. 2025.

JIAO, J.; ZHAO, J.; PEI, Y. Adsorption of Co (II) from aqueous solutions by water treatment residuals. **J. Environ. Sci. (China)**. v.52, p.232–239, 2017.

LAGERGREN, S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. **Handlingar**, v. 24, n. 4, p. 1-39, 1898.

LANGMUIR, Irving. The dissociation of hydrogen into atoms. Iii. The mechanism of the reaction. **Journal of the American Chemical Society**, v. 38, n. 6, p. 1145-1156, 1916. <https://doi.org/10.1021/ja02263a001>.

LERMEN, A. M. *et al.* The use of agro-industrial waste for adsorption of the blue dye of methylene: a brief review. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v.5, n.1, p. 273-288, jan-fev 2021.

LIMA, V. E. de *et al.* Avaliação do uso de materiais residuais como adsorventes para remoção de Pb²⁺ em efluentes de laboratórios/ Avaliação do uso de materiais residuais como adsorventes para remoção de Pb²⁺ em efluentes de laboratórios. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, [S. l.] , v. 12, pág. 97249–97262, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n12-280. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/21455>. Acesso em: 6 mar. 2025.

LIMA; LIMA; SANTOS. (2023). **ANÁLISE DA TENDÊNCIA E SAZONALIDADE DO LIMÃO TAHITI TREND AND SEASONALITY ANALYSIS OF TAHITI LEMON**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1162386/1/Analise-da-tendencia-e-sazonalidade-do-limao-Tahiti-2023.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LOPES, D. SOLUÇÃO TAMPÃO. **MANUAL DA QUÍMICA**. Omnia – GO - 2023. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/solucaotampao.com>. Acesso: 25 de janeiro de 2025.

MACENA, M. W. Análise do potencial de adsorção de íons metálicos em solução aquosa por resíduos lenhocelulósicos. 2021. 71f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – **Instituto Politécnico de Viseu**, Portugal, 2021.

MAGNA, G. A. M. *et al.* Chumbo e cádmio detectados em alimentos vegetais e gramíneas no município de Santo Amaro -Bahia. **Quim. Nova**, v. 36, n. 7, p. 989–997, 2013.

MAHAR, A. *et al.* Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.126, p.111–121, 2016.

MARQUES, V. da C. *et al.* **Valorization of tangerine peels in the preparation of adsorbents for removal of Ni (II) from aqueous solutions**. 2020.

MARSCHNER, H. Introduction, Definition, and Classification of Mineral Nutrients. In: Marschner, H, Mineral nutrition of higher plants. **Toronto: Academic Press**, 2 ed. 1995 p. 04-05.

MARTINS, W. A. *et al.* **USO DA CASCA DA BANANA NATURAL NA REMOÇÃO DE CHUMBO PARA REMEDIAÇÃO DE EFLUENTES AQUOSOS A PARTIR DO PROCESSO DE ADSORÇÃO.**

MENEZES, J. M. C. *et al.* Bioadsorção competitiva de íons Pb^{+2} e Cu^{+2} por *Caryocar coriaceum* WITTM. Barks. **Água Ar Solo Poluição** 234, 428 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06419-0>.

MENEZES, J. M. C. *et al.* Equilibrium, kinetics and thermodynamics of lead (II) adsorption in bioadsorbent composed by *Caryocar coriaceum* Wittm barks. **Chemosphere**, v. 261, p. 128144, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128144>.

MOREIRA, D. A. *et al.* Biossorção de metais pesados pela casca de ovo de galinhas poedeiras. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 7, p. 289-295, 2018.

MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 9, n. 1, p. 167-181, 2004.

NASCIMENTO, B. G. USO DA FOLHA DE COUVE “*Brassica oleracea*” NA ADSORÇÃO DE ÍONS Fe^{2+} . 2022. 32f. TCC (Licenciatura em Química) - o **Instituto Federal Goiano – Campus Ceres**. Ceres – GO, 2022.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* Adsorção [livro eletrônico]: aspectos teóricos e aplicações ambientais - 2. ed. - **Fortaleza: Imprensa Universitária**, 2020. 4749 Kb: il. color; PDF (Estudos da Pós-Graduação).

NOVAIS, S. A. "Metais pesados"; **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilestela.uol.com.br/quimica/metais-pesados.htm>. Acesso em 02 de julho de 2025.

OLIVEIRA, Y. R. Estudo da adsorção de Cu(II) utilizando biocarvões de palha de café conilon. 2018. 37 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - **Universidade Federal do Espírito Santo**, Alegre. 2018.

OLIVO, A. DE M.; ISHIKI, H. M. Brasil frente à escassez de água. In: **Colloquium Humanarum**. ISSN: 1809-8207. 2014. p. 41-48.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. (2010). **Childhood Lead Poisoning**. <https://www.who.int/publications/i/item/childhood-lead-poisoning>.

PENNACCHI, J. P. (2024). **Gestão de Resíduos na Agricultura: Melhores Práticas**. Disponível em: <<https://blog.aegro.com.br/gestao-de-residuos-na-agricultura/>>.

PILON, G. D. *et al.* Intoxicação por chumbo em crianças e sintomas neurológicos. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e161111436031-e161111436031, 2022.

PINO, G. A. H. Biossorção de Metais Pesados Utilizando Pó da Casca de Coco Verde (Cocos nucifera). **PUC** - Rio de Janeiro, 2005.

PINTO, W. do N.; CORINGA, E. A. O. *et al.* Propriedades eletroquímicas e adsorptivas de farinhas de frutas e legumes utilizadas como bioadsorventes naturais. In: **Simpósio Latino-Americano de Ciência dos Alimentos**, 2017, Campinas. *Anais eletrônicos do Simpósio Latino-Americano de Ciência dos Alimentos*, Campinas: Galoá, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/slaca/slaca-2017/papers/propriedades-eletroquimicas-e-adsorptivas-de-farinhas-de-frutas-e-legumes-utiliza?lang=pt-br>. Acesso em: 13 maio 2025.

PIQUET, A. B. M.; MARTELLI, M. C. Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 3, pág. e27311326506-e27311326506, 2022.

POHNDORF, R. S. *et al.* Cinética e termodinâmica da adsorção de carotenóides e clorofilas no branqueamento de óleo de farelo de arroz. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 948-957, 2015.

RAASCH, L. B. *et al.* Adsorção de chumbo (II) em solução aquosa usando carvão ativado do caroço da manga (*Mangifera indica* L.). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 4, p. e20240219, 2024.

RAHMAN, S. U. *et al.* 2022. State-of-the-art OMICS strategies against toxic effects of heavy metals in plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 242: 113952.

REDAÇÃO AGRO ESTADÃO. **Limão-taiti não é limão, você sabia? | Agro Estadão**. Disponível em: <<https://agro.estadao.com.br/economia/limao-taiti-nao-e-limao-voce-sabia>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

RIBAS, F. B. T.; SILVA, W. L. da. Biossorção: uma revisão sobre métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13212, 2023.

RIZVI, A. *et al.* 2020. Heavy metal induced stress on wheat: phytotoxicity and microbiological management. **Royal Society of Chemistry**, 10: 38379-38403.

ROSSI, P. L.; PANDOLFI, M. A. C. Análise de Mercado da Lima Ácida Tahiti. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 2, p. 255-263, 2019.

SAHEBJAMEE, N. *et al.* Preparation and characterization of porous chitosan-based membrane with enhanced copper ion adsorption performance. **Reactive and functional polymers**, v. 154, 2020.

SAMAN, N. *et al.* Adsorptive efficacy analysis of lignocellulosic waste carbonaceous adsorbents toward different mercury species. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 96, n. 1, p. 33-42, 2015.

SANTANA, A. H. *et al.* Copper and lead ion removal from wastewater using fava d'anta fodder (*Dimorphandra gardneriana* Tulasne). **Environmental Geochemistry and Health**, v. 1, p. 1-1, 2020.

SANTANA, J. S.; SANTOS, B. R.; RESENDE, B. O. Utilização da casca de banana como bioadsorvente para adsorção de metais pesados viabilizando sua utilização em águas residuárias da indústria galvânica. **INOVAE** - ISSN: 2357-7797, São Paulo, Vol.8, JAN-DEZ, 2020 - pág.

143-157.

SANTOS, C. M. Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água. 2015. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais) - **Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”**, Sorocaba. 2015.

SANTOS, Y T. C. *et al.* Adsorption of Zn (II) IONS by *Ziziphus joazeiro* barks in aqueous solutions. **Results In Chemistry**, v. Xx, p. 101339, 2024.

SAO, K. *et al.* Remoção biossorbitiva altamente eficiente de chumbo de efluentes industriais. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 18410-18420, 2017.

SEBRAE. **O cultivo e o mercado do limão**. SEBRAE, 7 jan. 2016. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-do-limao,9e7a9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>. Acesso em: 5 mar. 2025.

SHAHMIRZADI, M. A. A. *et al.* Significance, evolution and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination, water softening and salt removal. **J. Environ. Manage.** 215 (2018) 324–344. doi:10.1016/j.jenvman.2018.03.040.

SILVA, B. C. E. Chumbo. In: BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Balanco Mineral Brasileiro**. Brasília, 2001.

SILVA, M. Q. *et al.* Modelo de gestão ambiental para a Baía de Guanabara a partir das boas práticas do Programa Enseada Limpa. Dissertação (Especialização em Gestão Pública com ênfase em Governo Local) – **Escola Nacional de Administração Pública**, Distrito Federal, 2018.

SILVA, T. da. Avaliação do uso de folhas de amora (*Morus nigra* L.) como biossorvente para adsorção de cobre e zinco de amostras aquosas. 2022. 46f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - **Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”**, Botucatu. 2022.

SIQUEIRA, D. L. *et al.* **Produção de limão Taiti**. Viçosa, MG: CPT, 2009. 214 p.

SOARES, J. L. Remoção de corantes têxteis por adsorção em carvão mineral ativado com alto teor de cinzas. **Repositório Institucional da UFSC**, [s. l.], 1998. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77807>.

SONG, S. T. *et al.* Removal of Hg (II) from aqueous solution by adsorption using raw and chemically modified rice straw as novel adsorbents. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 36, p. 13092-13101, 2013.

SOUSA, B. C. de. Análise da eficiência da remoção de cobre em solução aquosa por biofiltro de fibra de coco e vermiculita. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) - Campus de Crateús, **Universidade Federal do Ceará**, Crateús, 2025.

SOUZA, A. K. R.; MORASSUTI, C. Y.; DEUS, W. B. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

SOUZA, C. O. de. **Estudo de adsorção dos íons Cu (II) e Pb (II) em meio aquoso utilizando**

a casca de manga da variedade *Tommy atkins*. 2025. 82p. Dissertação (Mestrado em Química Biológica) - Universidade Regional do Cariri - URCA, Crato-CE, 2025.

SOUZA, E. S. *et al.* Utilização da farinha da casca de laranja como bioadsorvente em efluentes têxteis. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 2020, v. 6, n. 8, p. 60101-60109, 21 ago. 2020.

SOUZA, W. D. M *et al.* Potencial da casca da laranja como bioadsorvente alternativo para remoção de metais pesados em águas residuais. **Blucher Chemistry Proceedings**, São Paulo, v. 3, ed. 1, novembro 2015.

STARK, A. A. P. *et al.* Intoxicação por chumbo: conflitos ambientais na América do Sul e perspectiva sob a conservação de aves silvestres. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e42510212701-e42510212701, 2021.

SUN, Q. *et al.* Extraction and separation of Fe (III) from heavymetal wastewater using P204 solvent impregnated resin. **Rare Met**, v. 37, p. 894–903, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0729-0>.

SURI, S.; SINGH, A.; NEMA, P. K. Aplicações atuais de resíduos do processamento de frutas cítricas: uma perspectiva científica. **Applied Food Research**, v. 2, n. 1, p. 100050, 2022.

TAVARES, J. M. *et al.* Identificação e quantificação de metais pesados nas panelas de barro vitrificadas de fabricação artesanal. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 2, p. 2406-2414, 2020. ISSN: 2595-6825. Acesso em: 18 fev. 2025.

TOLEDO, J. A. G.; ALMEIDA, A. S. C.; D'AMELIO, M. T. S. Estudo da adsorção de chumbo utilizando bagaço de cana-de-açúcar ativado. **Ensaio Usf, [SL]**, p. 43-62, 2020.

TUNDISI, J. G. **Recursos Hídricos**. Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos, 2003. Disponível em http://www.multiciencia.unicamp.br/artigos_01/A3_Tundisi_port.PDF. Acesso em: 30 jun. 2025.

VAITSMAN, E. P.; VAITSMAN, D. S. **Química & Meio Ambiente: Ensino Contextualizado**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

VIEIRA, B.; BRAGA, D. M.; JESUS, T. A. Biossorção de Cd (II) utilizando casca de laranja como substrato. **Encontro Nacional de Águas Urbanas**, São Paulo, 2014.

ANEXO – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DE ARTIGO CIENTÍFICO

Chemistry and Biodiversity
Investigation of Pb²⁺ Ion Adsorption by Biomass Derived from Taiti Lime (Citrus latifolia Tanaka) Peel
--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Research Article
Corresponding Author:	RAIMUNDO NONATO PEREIRA TEIXEIRA, Dr. Regional University of Cariri: Universidade Regional do Cariri Crato, CE BRAZIL
Corresponding Author E-Mail:	raimundo.teixeira@urca.br
Other Authors:	Brenda da Silva Vilar Freitas, Ms Carliane de Oliveira de Souza, master's degree Victor Feitosa Teixeira, master's degree Jorge Marcell Coelho Meneses, PhD Francisco José de Paula Filho, PhD Francisco Rafael Pereira Teixeira, master's degree
Keywords:	Heavy Metals; Adsorption; Environmental; Water Treatment
Manuscript Classifications:	Analytical Chemistry
Suggested Reviewers:	Diego Quadros Melo, PhD professor, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano - Campus Petrolina: Instituto Federal de Educacao Ciencia e Tecnologia do Sertao Pernambuco - Campus Petrolina diegodqm@gmail.com Researcher with experience in metal adsorption Carla Bastos Vidal, PhD professora, Federal University of Ceara: Universidade Federal do Ceara carlavidal@ufc.br Researcher with experience in metal adsorption
Opposed Reviewers:	
Abstract:	The objective of this study was to evaluate the adsorption process of lead (II) ions using Taiti lime (Citrus latifolia Tanaka) peel in aqueous solution. The material was washed with distilled water and oven-dried at 323.15 K for 72 hours. The peels were ground and sieved to obtain a more homogeneous sample. The material was characterized using (FTIR) and (SEM), which confirmed the adsorption of Pb(II) ions. Adsorption kinetics and isotherm studies were then conducted, along with the evaluation of thermodynamic parameters. The results showed that the system reached equilibrium in approximately 60 minutes, following a pseudo-second-order kinetic model, with an adsorption capacity of 10.04 mg·g ⁻¹ at the maximum study time (120 min). The Langmuir isotherm model presented the best fit among the evaluated models, with an R ² of 0.9996, allowing for the calculation of thermodynamic parameters. The maximum adsorption capacity obtained was 55.25 mg·g ⁻¹ at 283 K. Thermodynamic analysis indicated that the adsorption process was physical, favorable, spontaneous and endothermic, with an enthalpy (ΔH°) of 7.2614 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹ and an entropy (ΔS°) of 130.5132 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹ . It can be concluded that Taiti lime peel is a viable and efficient biosorbent for the removal of lead (II) from aqueous solutions.
Author Comments:	Dear Editor, We are pleased to submit our manuscript entitled "Investigation of Pb ²⁺ Ion Adsorption by Biomass Derived from Taiti Lime (Citrus latifolia Tanaka) Peel" for consideration for publication in Chemistry & Biodiversity.

	This study explores the potential of a sustainable, low-cost biosorbent derived from Taiti lime peel for the removal of lead (Pb^{2+}) ions from aqueous solutions. Using a combination of batch adsorption experiments, surface characterization techniques, and kinetic and isotherm modeling, we provide insights into the mechanism of Pb^{2+} removal and the physicochemical properties that influence the biosorption process. Given the ongoing interest in green chemistry, circular bioeconomy, and biodiversity-based solutions for environmental remediation, we believe this work will be of relevance to the readership of Chemistry & Biodiversity. The use of an agro-industrial waste product aligns with sustainable development goals and highlights the value of biodiversity in addressing environmental challenges. This manuscript is original, has not been published elsewhere, and is not under consideration by another journal. All authors have read and approved the final version and have no conflicts of interest to declare. We kindly thank you for considering our work for publication and look forward to your response. Sincerely, Raimundo Nonato Pereira Teixeira Department of Biological Chemistry, Regional University of Cariri raimundo.teixeira@urca.br On behalf of all authors
Section/Category:	
Additional Information:	
Question	Response
Dedication	does not apply
This journal supports data sharing and has adopted an Expected Data Sharing policy :	Data available on request due to privacy/ethical restrictions
- You are encouraged to make your data available, for instance in a public repository. - Your article must include a Data Availability Statement; please select a template from the options below or provide a custom Statement. - When data is openly available, please provide the name and URL/DOI of the repository and cite the data in the references section of your manuscript.	
Is your data available?	

Does the research described in this manuscript include human research participants (including for experiments with sensors or wearable technologies) or tissue samples from human subjects (including blood or sweat)?	No
--	----

Investigation of Pb²⁺ Ion Adsorption by Biomass Derived from Taiti Lime (*Citrus latifolia* Tanaka) Peel

Brenda da Silva Vilar Freitas¹, Carliane de Oliveira de Souza¹, Victor Feitosa Teixeira¹, Jorge Marcell Coelho Menezes³, Francisco José de Paula Filho⁴, Francisco Rafael Pereira Teixeira Raimundo Nonato Pereira Teixeira¹

Regional University of Cariri, Graduate Program in Biological Diversity and Natural Resources¹, Crato, Ceará, Brazil; Department of Biological Chemistry², Regional University of Cariri, Crato, Ceará, Brazil; Federal University of Cariri³, Juazeiro do Norte, Ceará, Brazil; Department of Physics⁴, Federal University of Ceará, Fortaleza, Ceará, Brazil

ABSTRACT

Environmental contamination by toxic metals has become one of the most pressing challenges faced today, primarily due to their widespread release from industrial waste streams. Among these metals, lead is particularly concerning due to its high toxicological potential and its capacity to cause severe damage to human health. Biosorption stands out as a cost-effective and easy-to-operate technique for removing such contaminants from wastewater. A considerable portion of waste generated in agro-industrial processes such as peels and bagasse is commonly discarded without proper disposal. The use of plant biomass has, therefore, emerged as a more economical and effective alternative to traditional effluent treatment methods, due to its high availability and accessibility. In this context, the objective of this study was to evaluate the adsorption process of lead (II) ions using Taiti lime (*Citrus latifolia* Tanaka) peel in aqueous solution. The material was washed with distilled water and oven-dried at 323.15 K for 72 hours. Subsequently, the peels were ground and sieved to obtain a more homogeneous sample. The material was characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM), which confirmed the adsorption of Pb(II) ions. Adsorption kinetics and isotherm studies were then conducted, along with the evaluation of thermodynamic parameters. The results showed that the system reached equilibrium in approximately 60 minutes, following a pseudo-second-order kinetic model, with an adsorption capacity of 10.04 mg·g⁻¹ at the maximum study time (120 min). The Langmuir isotherm model presented the best fit among the evaluated models, with an R² of 0.9996, allowing for the calculation of thermodynamic parameters. The maximum adsorption capacity obtained was 55.25 mg·g⁻¹ at 283 K. Thermodynamic analysis indicated that the adsorption process was physical, favorable, spontaneous and endothermic, with an enthalpy (ΔH°) of 7.2814 J·mol⁻¹·K⁻¹ and an entropy (ΔS°) of 130.5132 J·mol⁻¹·K⁻¹. It can be concluded that Taiti lime peel is a viable and efficient biosorbent for the removal of lead (II) from aqueous solutions.

Key-Words: Heavy Metals, Adsorption, Environmental, Water Treatment.