

Síntese de materiais sustentáveis a partir de biomassa residual para o tratamento de efluentes contaminados por níquel

Synthesis of Sustainable Materials from Residual Biomass for the Treatment of Nickel-Contaminated Effluents

Rafael Piovesan PISTOIA^{1,2}, Bernardo Severo CARVALHAL¹, Érika de Castro CHEQUIM¹, Lorenzo dos Santos FRANCO¹, Milton Henry Paludett BORGES¹, Otávio Minozzo SOBROZA¹, Pedro Bacin da SILVA¹, Marcelo Marques TUSI^{1,3*}

1 – Rede Verzeri, Colégio Medianeira – Santiago-RS, Brasil.

2 – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Escola de Educação Básica da URI – Santiago-RS, Brasil.

3 – Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Santiago-RS, Brasil.

*Autor correspondente - e-mail: mmtusi@gmail.com

RESUMO

Muitos ambientes, atualmente, encontram-se degradados devido a poluição por substâncias químicas como metais pesados, corantes e poluentes orgânicos persistentes, além de poluentes emergentes como moléculas de hormônios, drogas e medicamentos que se difundem na água e no solo. Neste contexto, pesquisas abordando novos materiais e/ou técnicas para o tratamento de efluentes têm ganhado importância. Dentre os métodos de tratamento de águas residuárias, a adsorção se destaca por sua eficiência e custo-benefício. Tal método emprega materiais adsorventes, caracterizados por uma superfície sólida insolúvel, geralmente porosa e com alta área superficial, capazes de aderir moléculas solúveis dispersas em meio líquido ou gasoso. Estudos envolvendo a síntese de materiais adsorventes a partir de biomassa residual também têm crescido de forma a diminuir a quantidade de resíduos sólidos gerados e dispostos em aterros bem como produzir um produto de valor agregado a partir de um rejeito. Este trabalho teve como objetivo produzir adsorventes a partir de rejeitos domésticos (erva-mate e pó de café descartados) e avaliar sua aplicação na remoção de íons Ni^{2+} em solução, visando a produção de materiais alternativos para o tratamento de efluentes líquidos potencialmente tóxicos. A erva-mate e o pó de café previamente secos e tamisados foram carbonizados a 500 °C por 15 min e utilizados como materiais adsorventes em solução contendo 1000 mg/L de íons Ni^{2+} , com os teores de íons Ni^{2+} determinados por volumetria de precipitação. Adicionalmente, foi modelada a isoterma que descreve o processo de adsorção no adsorvente de melhor resultado. O adsorvente a base de erva-mate carbonizada, sem modificação adicional, apresentou o melhor desempenho (77%) na remoção de íons Ni^{2+} da solução, sendo o processo de adsorção melhor descrito pelo modelo de Freundlich, com um coeficiente de determinação (R^2) de, aproximadamente, 0,99.

Palavras-chave: *Ilex paraguariensis*; *Coffea arabica*; íons Ni^{2+} ; isoterma de Freundlich.

ABSTRACT

Many environments are currently degraded due to pollution by chemical substances such as heavy metals, dyes, and persistent organic pollutants, as well as emerging contaminants, including hormone molecules, drugs, and pharmaceuticals that spread through water and soil. In this context, research focusing on the development of new materials and/or techniques for effluent treatment has gained increasing importance. Among wastewater treatment methods, adsorption stands out for its efficiency and cost-effectiveness. This process employs adsorbent materials characterized by an insoluble solid surface, generally porous and with a high specific surface area, capable of adhering soluble molecules dispersed in a liquid or gaseous medium. Studies involving the synthesis of adsorbent materials from residual biomass have also increased, aiming to reduce the amount of solid waste generated and disposed of in landfills, while producing value-added products from waste materials. The present work aimed to produce adsorbents from domestic residues (discarded yerba matee and spent coffee grounds) and to evaluate their application in the removal of Ni^{2+} ions from aqueous solution, with the goal of developing alternative materials for the treatment of potentially toxic liquid effluents. The yerba matee and coffee residues, previously dried and sieved, were carbonized at 500 °C for 15 minutes and used as adsorbent material in a solution containing 1000 mg/L of Ni^{2+} ions. The nickel ion content was determined by complexometric titration. Additionally, the adsorption process was modelled using adsorption isotherms. The carbonised yerba matee-based adsorbent, without further modification, exhibited the best performance (77%) in the removal of Ni^{2+} ions from solution. The adsorption process was best described by the Freundlich model, with a determination coefficient (R^2) of approximately 0.99.

Keywords: *Ilex paraguariensis*; *Coffea arabica*; Ni^{2+} ions; Freundlich isotherm.

1. INTRODUÇÃO

A poluição de recursos hídricos por poluentes orgânicos persistentes, metais pesados e outros compostos ocasiona risco à saúde das pessoas bem como prejuízos à fauna e ao meio ambiente. Uma das fontes de tais contaminações pode ser o despejo de efluentes líquidos sem tratamento adequado (Brasil, 1973; Santos, Martins, 2002).

Com o avanço da atividade industrial e as falhas no sistema de fiscalização ambiental, efluentes contendo substâncias orgânicas e íons metálicos tóxicos são liberados em corpos d'água, podendo causar malefícios para a saúde da população em caso de consumo da água contaminada (Lima; Merçon, 2011; Oliveira, 2011). Adicionalmente, o despejo de substâncias tóxicas em rios e barragens causa danos ao bioma aquático, uma vez que tais poluentes causam problemas aos animais dos habitats contaminados (Ngo et al, 2022).

Portanto, o tratamento de efluentes líquidos domésticos e industriais é de suma importância para a manutenção de uma boa qualidade de vida das pessoas bem como para a preservação do ambiente (Baharvand, Daneshvar, 2018). Neste contexto, ganham destaque pesquisas que têm como objetivo o desenvolvimento e/ou aprimoramento de metodologias de tratamento de efluentes líquidos bem como o desenvolvimento de materiais que possam ser utilizados no tratamento e descontaminação de despejos líquidos (Limousy, Thiebault, Brendle, 2022).

O uso da adsorção é bastante eficiente na remoção de substâncias como íons metálicos de efluentes líquidos, sendo que a síntese de materiais que possam ser utilizados como adsorventes é bastante relatada na literatura científica. A síntese e otimização de propriedades de carvões ativados têm atraído a atenção de pesquisadores, sendo que o uso de resíduos sólidos constituídos de biomassa é altamente atrativos por diminuir a deposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários, aumentando a vida útil dos mesmos e agregando valor a um resíduo (Guilhen, 2018; Ugwu, Agunwamba, 2020; Elewa et al., 2023; Wang et al., 2023).

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é um produto bastante utilizado na cultura do Rio Grande do Sul, sendo consumida na forma de bebidas tônicas e estimulantes, como o chimarrão, tererê e chá mate (Duarte, 2020). De acordo com dados apresentados por Zanin e Meyer (2018), em 2017 o Rio Grande do Sul teve o maior consumo anual per capita do país (4,5 kg), seguido de Paraná (1,9 kg), Santa Catarina (1,55 kg) e Mato Grosso do Sul (1,45 kg).

O café, por sua vez, é a segunda bebida mais consumida no mundo, ficando atrás apenas

da água. No contexto do cenário nacional, o café é uma das bebidas mais apreciadas entre os brasileiros, sendo associada a diversas situações que promovem sua degustação (Oshiiwa et al., 2024). O Brasil, entre 2008 e 2009, foi o segundo maior mercado consumidor de café e o café foi o segundo alimento mais consumido no país, com uma prevalência de 79% (estimada a partir de dados de apenas um dia de consumo alimentar). No período mencionado, o consumo médio habitual de café no Brasil correspondeu a 163 mL, ou cerca de 1,5 xícara por dia. (Sousa; Costa, 2015).

O consumo destes produtos gera uma grande quantidade de resíduo sólido orgânico, muitas vezes descartado no lixo comum para disposição final em aterros sanitários. Portanto, do ponto de vista de práticas sustentáveis, utilizar este resíduo de forma a agregar valor a ele, reduzindo seu descarte é extremamente interessante (Foresti Júnior et al., 2020; Franca, Oliveira, 2022; Magalhães et al., 2025).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo sintetizar adsorventes a partir de rejeitos domésticos (erva-mate e pó de café) e avaliar sua aplicação na remoção de íons Ni^{2+} em solução bem como determinar o modelo que melhor descreve o modelo de adsorção para o material de melhor desempenho.

A escolha dos íons Ni^{2+} se justifica pelo fato de o níquel ser utilizado em diversos processos industriais, podendo-se destacar os processos galvânicos (Moreira, 2010). Segundo Macomber e Hausinger (2010), o níquel é um importante agente tóxico para os seres humanos, incluindo a capacidade de induzir carcinomas. Em estudo envolvendo microrganismos foi observada a substituição de metais essenciais em metaloproteínas, a ligação do níquel a resíduos catalíticos de enzimas não metálicas, a inibição alostérica de enzimas por ligação fora do sítio catalítico e a indução indireta de estresse oxidativo (Macomber, Hausinger, 2010).

A determinação do modelo de isoterma de adsorção é fundamental para caracterizar o mecanismo físico-químico que rege a interação entre adsorvente e adsorvato. Através do ajuste dos dados experimentais a diferentes modelos (como Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, entre outros), é possível inferir se a adsorção ocorre em sítios homogêneos ou heterogêneos, se forma monocamada ou multicamadas, bem como estimar parâmetros-chave como a capacidade de adsorção máxima e a intensidade da adsorção. Esses parâmetros são essenciais não apenas para a compreensão teórica do sistema, mas também para o dimensionamento de processos práticos, como o tratamento de água e a regeneração do adsorvente (Musah et al., 2023). Além disso, a modelagem da isotérmica permite prever o comportamento do adsorvente em diferentes concentrações, otimizar seu uso e

comparar a eficiência entre diferentes materiais (JEPPU *et al.*, 2023).

2. METODOLOGIA

2.1. Preparação da Biomassa

A erva-mate e o pó de café descartados foram coletados e congelados (imediatamente após a coleta) para que não sofressem processos que viessem a degradar o produto. Após, foram secos a 70 °C por 48 h e, posteriormente, tamisados usando peneira *mesh* 60 para eliminação de materiais com granulometria maior.

Por se tratar de um estudo preliminar, não foi um ponto de preocupação a espécie de café (*C. arabica* e/ou *C. canephora*) que deu origem à mistura de pós usados para produção do adsorvente. Adicionalmente, o parâmetro relacionado à espécie de origem do pó do café descartado seria de difícil controle e muito possivelmente negligenciada, ao considerar uma produção em larga escala.

2.2. Síntese dos Materiais Adsorventes

Para obtenção do carvão ativado foi usada a metodologia de Hammud *et al.* (2016). A erva-mate (*I. paraguariensis*) e o pó de café (*C. arabica* e/ou *C. canephora*) foram acondicionados em cadinhos de porcelana e levados para uma mufla para serem carbonizados a 500 °C por 15 min em atmosfera estática de ar sendo, posteriormente, resfriados à temperatura ambiente em um dessecador.

2.3. Ensaios de Remoção de Íons Ni⁺²

Em um bquer de 100 mL, foi colocada uma alíquota de 20 mL da solução contendo o íon Ni⁺² (concentração inicial de, aproximadamente, 1000 mg/L) e 1 g dos materiais adsorventes obtidos (Moreira, 2010). A mistura foi mantida sob agitação por 1 h em temperatura ambiente. Para fins comparativos, foram testados bentonita e carvão ativado comercial nas mesmas condições.

2.4. Determinação do Teor de Íons Ni⁺² em Solução

As concentrações de íons Ni⁺² em solução foram determinadas por volumetria de complexação. Depois do ensaio de adsorção, procedeu-se com a centrifugação do meio proveniente do ensaio de remoção de íons Ni⁺² para separar o adsorvente do sobrenadante. Após, o sobrenadante foi tamponado em pH = 10 com solução tampão NH₄OH/NH₄Cl e uma ponta de espátula de murexida foi adicionada. A solução resultante foi titulada com solução 0,01 mol/L de EDTA (ácido etilenodiaminotetracético), até o aparecimento de uma coloração violeta (Moreira, 2010). Antes do processo de remoção de íons Ni⁺² a solução foi titulada pelo mesmo procedimento para determinação do teor inicial de níquel em solução.

2.5. Determinação da Isoterma de Adsorção

Foram preparadas soluções com concentrações conhecidas de íons Ni⁺². Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, sob agitação por 1 h. A uma alíquota de 20 mL da solução contendo íons Ni⁺² nas concentrações nominais de 10; 25; 50; 75 e 100 mg/L foi adicionado 0,1 g do adsorvente preparado pela carbonização de erva-mate. Antes e após o processo de adsorção, a concentração de íons Ni⁺² na solução foi determinada por volumetria de complexação utilizando EDTA conforme procedimento já descrito.

Após a obtenção dos valores de concentração no equilíbrio (C_e) e da quantidade de adsorbato retido por unidade de massa do adsorvente (q_e), foi realizada a modelagem matemática do processo de adsorção por meio de ajuste dos dados experimentais a equações empíricas empregadas para descrever o equilíbrio sólido-líquido. Os parâmetros do modelo foram obtidos por regressão linear aplicada às formas transformadas das equações correspondentes. A qualidade do ajuste foi avaliada por indicadores estatísticos, incluindo o coeficiente de determinação (R^2) e o erro quadrático médio (RMSE). Adicionalmente, a constante obtida pelo ajuste foi utilizada como parâmetro análogo de equilíbrio para o cálculo da energia livre padrão aparente do processo (ΔG^0), segundo a relação termodinâmica convencional.

O RMSE foi calculado segundo a equação (1):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{e-calc} - q_{e-exp})^2} \quad (1)$$

onde q_{e-calc} representa os valores preditos pelo modelo ajustado e q_{e-exp} os valores experimentais obtidos. Em conjunto, valores elevados de R^2 e baixos de RMSE indicam que o modelo descreve adequadamente o comportamento experimental. (Ho, McKay, 1998).

A energia livre padrão aparente foi estimada utilizando a constante empírica ajustada como parâmetro análogo de equilíbrio, aplicando-se a equação (2):

$$\Delta G^0 = -R.T.\ln(K) \quad (2)$$

onde R é a constante universal dos gases e T a temperatura absoluta (Özzin *et al.*, 2019).

Tal abordagem fornece somente uma estimativa aproximada da espontaneidade do processo, entretanto seu uso é amplamente relatado na literatura para fins comparativos em estudos de adsorção.

A avaliação para identificar o modelo de adsorção (Langmuir ou Freundlich) foi realizada apenas para o material que alcançou a maior porcentagem de remoção de íons Ni⁺² da solução.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado anteriormente, foram preparados carbonos adsorventes a partir da carbonização de pó de café e erva-mate descartados. A Tabela 1 apresenta as perdas de massa e o rendimento do processo de carbonização. Os valores de perda de massa registrados foram cerca de 90% para ambos os materiais, não apresentando grande diferença entre as perdas de massa registradas na carbonização do pó de café e da erva-mate. No que diz respeito ao rendimento da carbonização, a erva-mate apresentou um rendimento ligeiramente maior (9,71%) comparado ao rendimento da carbonização do pó de café (8,75%).

Silva (2022) produziu chars através da pirólise de bagaço de uva em atmosfera de N_2 e diferentes temperaturas de pirólise (700, 800 e 900 °C) alcançando rendimentos próximos de 30%. O rendimento maior observado em comparação com os dados apresentados no presente estudo se justifica pelas condições diferentes usadas para obtenção dos materiais. A taxa de aquecimento, a temperatura final, o fluxo de gás de arraste e natureza da matéria-prima são os principais parâmetros que norteiam a qualidade e o rendimento do produto carbonizado (Claudino, 2003; Mohan, Pittman, 2006).

Os resultados dos testes de remoção de íons Ni^{2+} em solução estão apresentados na Tabela 2. O adsorvente preparado a partir da erva-mate removeu cerca de 77% dos íons Ni^{2+} da solução, enquanto o preparado a partir de pó de café alcançou uma remoção de 48%. Os materiais comerciais bentonita e carvão ativado alcançaram valores de remoção de 64% e 28%, respectivamente.

Os adsorventes produzidos por carbonização de biomassa contêm diversos grupos funcionais oxigenados na superfície (como carboxílicos, fenólicos e hidroxilas), os quais são cruciais para suas propriedades de adsorção de cátions metálicos e outros contaminantes (Fakhar *et al.*, 2025). A adsorção envolvendo troca iônica é outro mecanismo de adsorção possível de ser observado em adsorventes similares aos apresentados neste estudo (Yu *et al.*, 2016).

Tabela 2 – Dados dos experimentos de remoção de íons Ni^{2+} da solução usando diferentes adsorventes.

	V_{EDTA} (mL)	$[Ni^{2+}]$ (mg/L)	Remoção (%)
Solução inicial	8,7	1021,0	-
Carvão de erva	0,4	234,8	77
Carvão de café	0,9	528,2	48
Bentonita*	6,7	393,0	64
Carvão ativado*	13,4	787,0	28

Fonte: Autoria própria (2025)

Possivelmente, os cátions metálicos se ligam ao biossorvente por meio de interações com carboxilas e grupos fenólicos (Jacques *et al.*, 2007). Adicionalmente, a remoção de íons Ni^{2+} da solução utilizando o adsorvente obtido pela queima de erva-mate supera os materiais comerciais (bentonita e carvão ativo) utilizados como base de comparação.

Tal resultado supera os valores obtidos por Moreira (2010), que encontrou um valor máximo de 46,21% de redução de concentração de íons Ni^{2+} de um efluente real usando material adsorvente preparado a partir da casca de noz-pecã em uma quantidade de 100 g de adsorvente em 500 mL de efluente.

Conforme mencionado, o material de melhor resultado no teste preliminar de adsorção, ou seja, o material que apresentou a maior remoção de íons Ni^{2+} , foi submetido a uma avaliação para identificar o modelo de adsorção (Langmuir ou Freundlich). Antes da determinação do modelo de adsorção, as concentrações nominais de íons Ni^{2+} foram aferidas por meio da titulação usando solução 1.10^{-4} mol/L de EDTA, (Tabela 3).

Tabela 3 – Padronização das soluções contendo íons Ni^{2+} .

C_0 nominal de íons Ni^{2+} (mg/L)	Volume de solução de EDTA (mL)	C_0 real de íons Ni^{2+} (mg/L)
10	1,3	15
25	2,3	27
50	4,9	57
75	7,1	83
100	9,4	110

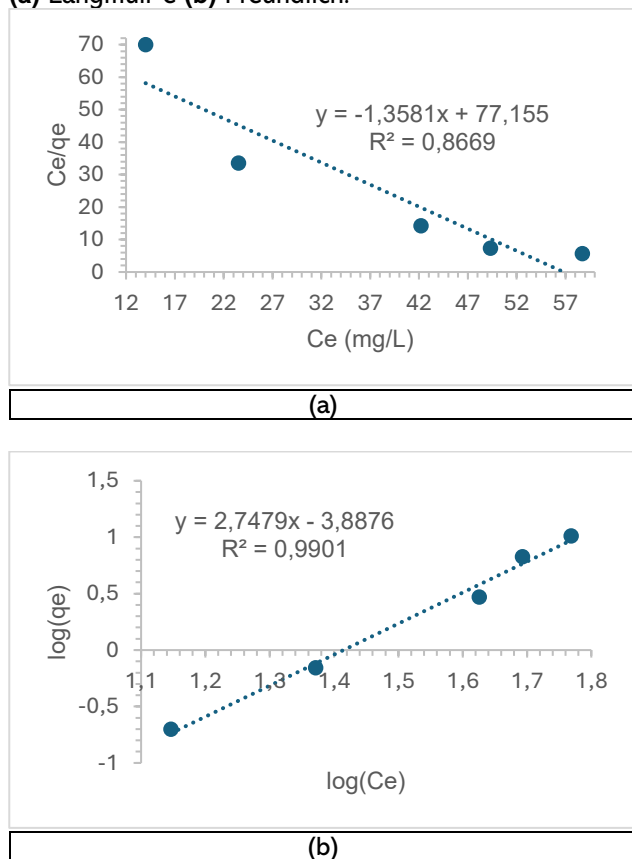
Fonte: Autoria própria (2025)

Pode-se observar que o processo de aferição das concentrações foi importante, uma vez que as concentrações reais se mostraram ligeiramente diferentes das concentrações nominais. A Tabela 4 apresenta os dados utilizados para a determinação do modelo de adsorção do adsorvente produzido a partir da erva-mate. A partir dos dados da Tabela 4, foram traçados gráficos (Figura 1) e realizado uma regressão linear.

A partir das curvas apresentadas na Figura 1, pode-se concluir que a adsorção no material obtido pela carbonização da erva-mate é melhor explicada pelo modelo de Freundlich, uma vez que o coeficiente de determinação (R^2) para tal isoterma foi de, aproximadamente, 0,99, enquanto para a isoterma de Langmuir obteve-se um valor de R^2 menor (cerca de 0,87). A qualidade do ajuste do modelo também foi confirmada pelo baixo valor de RMSE (0,063), indicando que a dispersão entre os valores experimentais e os valores calculados pelo modelo é mínima. A proximidade entre os dados experimentais e a predição do modelo reforça a adequação do ajuste e valida a interpretação da adsorção em superfície

heterogênea proposta por Freundlich (Ho, McKay, 1998).

Figura 1 - Regressão linear para os modelos de (a) Langmuir e (b) Freundlich.



Fonte: Autoria própria (2025).

O modelo de Langmuir tem uma base teórica que supõe que a adsorção ocorre em uma camada única (monocamada) sobre uma superfície homogênea de sítios considerando, portanto, que todos os sítios de adsorção são equivalentes, sendo que cada sítio pode reter no máximo uma molécula não havendo interação entre as moléculas adsorvidas. Por outro lado, o modelo de Freundlich é empírico, descrevendo a adsorção em superfícies heterogêneas, considerando que os sítios de adsorção não são equivalentes (variam em energia) e permitindo a adsorção em múltiplas camadas (Foo, Hameed, 2010; Kalam, 2021).

A partir da equação da reta obtida para a isoterma de Freundlich, foi possível determinar a constante de Freundlich (K_F) e a intensidade da adsorção (n). Os parâmetros obtidos para o modelo de Freundlich ($K_F = 1,29 \times 10^{-4}$; $n = 0,36$) indicam que, nas condições do estudo, o processo de adsorção apresenta baixa capacidade e baixa favorabilidade. O baixo valor de K_F sugere que o adsorvente possui pouca afinidade global com o adsorbato (íons Ni^{+2}), o que pode estar relacionado à natureza química da superfície ou à competição com outras espécies presentes. Além disso, o valor de n significativamente menor que 1 indica um sistema fortemente heterogêneo, com

predomínio de interações fracas entre adsorbato e adsorvente. Resultados semelhantes são relatados em sistemas nos quais o adsorvente não é quimicamente compatível com o soluto ou quando há predominância de interações físicas pouco intensas (Foo, Hameed, 2010; Fawzy *et al.*, 2022).

A partir da constante empírica ajustada, foi possível estimar a energia livre padrão aparente do processo (ΔG°), cujo valor obtido ($+22,18 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) indica que, sob as condições avaliadas, a adsorção não ocorre de maneira espontânea. Embora K_F não represente uma constante termodinâmica verdadeira, o resultado é coerente com o baixo valor de n e com a baixa afinidade global sugerida por K_F , reforçando que as interações entre íons Ni^{2+} e o material carbonáceo são fracas e predominantemente físicas (Özsin *et al.*, 2019).

Em conjunto, esses parâmetros estatísticos e termodinâmicos corroboram que o adsorvente obtido pela carbonização da erva-mate, nas condições do presente estudo, apresenta desempenho limitado para a remoção de íons Ni^{2+} , comportamento também observado em materiais carbonáceos de baixa funcionalização superficial descritos na literatura (Foo, Hameed, 2010; Özsin *et al.*, 2019).

Cabe salientar que o pH do meio é uma variável importante no processo de adsorção (Li *et al.*, 2022; Li, Zhao, Shang, 2025). De forma similar, tempo de contato e razão metal-adsorvente, além da velocidade de agitação são parâmetros igualmente importantes para avaliar a eficiência do material adsorvente (Kołodziej *et al.*, 2012; Banerjee *et al.*, 2016; Tho *et al.*, 2021). Por se tratar de um estudo preliminar, tais parâmetros não foram avaliados neste momento, entretanto, faz-se necessário uma análise dos mesmos em estudos futuros para uma melhor descrição e avaliação dos materiais adsorventes apresentados.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram sintetizados materiais adsorventes a partir da carbonização de erva-mate (*I. paraguariensis*) e de pó de café (*C. arabica* e/ou *C. canephora*) os quais foram testados para remoção de íons Ni^{+2} de uma solução aquosa preparada em laboratório de forma a simular o tratamento de um efluente líquido contaminado. O adsorvente a base de erva-mate carbonizada, sem modificação adicional, apresentou o melhor desempenho na remoção de íons Ni^{+2} da solução seguido pela bentonita. Trata-se de um resultado promissor, uma vez que a síntese do material pode ser otimizada de modo a melhorar o percentual de remoção de íons Ni^{+2} da solução. A adsorção no material obtido a partir da erva-mate foi melhor descrita pelo modelo de

Freundlich, com um coeficiente de determinação (R^2) de, aproximadamente, 0,99.

Estudos adicionais envolvem a avaliação da temperatura e do tempo de carbonização, bem como a realização de modificações do material obtido por exposição à ácidos e a síntese de adsorventes utilizando outros resíduos domésticos como cascas de frutas, assim como a avaliação da eficiência de tais materiais na remoção de outros metais e corantes. Parâmetros que influenciam o processo de adsorção (pH, tempo de contato e razão metal-adsorvente, por exemplo) também carecem de uma avaliação mais detalhada |

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAHARVAND, S.; DANESHVAR, M.R.M. Impact assessment of treating wastewater on the physiochemical variables of environment: a case of Kermanshah wastewater treatment plant in Iran. **Environmental Systems Research**, v. 8, art. n.º 18, 2019.
- BANERJEE, S.; MUKHERJEE, S.; LAMINKA-OT, A.; JOSHI, S.R.; MANDAL, T.; HALDER, G. Biosorptive uptake of Fe(2+), Cu(2+) and As(5+) by activated biochar derived from *Colocasia esculenta*: Isotherm, kinetics, thermodynamics, and cost estimation. **Journal of Advanced Research**, v. 7, n. 5, p. 597-610, 2016
- BRASIL. Decreto nº 73.030, de 30 de outubro de 1973. Cria, no âmbito do Ministério do Interior, a Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA, e de outras providências. **Câmara dos Deputados**. Brasília, 31 dez. 1973.
- CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Química, Florianópolis, 2003.
- DUARTE, M.M. **Ilex paraguayensis A.St.-Hil.: caracterização de morfotipos e genótipos para produção de compostos bioativos e propagação**. Curitiba, 2020. 149f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná.
- ELEWA, A.M.; AMER, A.A.; ATTALLAH, M.F.; GAD, H.A.; AL-AHMED, Z.A.M.; AHMED, I.A.. Chemically Activated Carbon Based on Biomass for Adsorption of Fe(III) and Mn(II) Ions from Aqueous Solution. **Materials**, v. 16, n. 3, p. 1251, 2023.
- FAKHAR, A.; GALGO, S.J.C.; CANATOY, R.C.; RAFIQUE, M.; SARFRAZ, R.; FAROOQUE, A.A.; KHAN, M.I. Advancing modified biochar for sustainable agriculture: a comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance. **Biochar**, v. 7, artigo número 8, 2025
- FAWZY, M.A.; AL-YASI, H.M.; GALAL, T.M.; HAMZA, R.Z.; ABDELKADER, T.G.; ALI, E.F.; HASSAN, S.H.A. Statistical optimization, kinetic, equilibrium isotherm and thermodynamic study for adsorption of ions by a biosorbent. **Scientific Reports**, v. 12, artigo número 8583, 2022.
- FOO, K.Y.; HAMEED, B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.
- FORESTI JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, J.C.; SOUZA, A.R.; MATOS, M.P.; FIA, R. Use of by-products generated in the processing of coffee berries: A review. **Coffee Science**, v. 15, p. 1-12, 2020.
- FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Potential Uses of Spent Coffee Grounds in the Food Industry. **Foods**, v. 11, n. 7, p. 1721, 2022.
- GUILHEN, S.N. **Síntese e caracterização de biocarvão obtido a partir do resíduo de coco de macaúba para remoção de urânio de soluções aquosas**. São Paulo, 2018. 325f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo.
- HAMMUD, K.K.; RAOUF, A.M.; AL-SAMMARRIE, A.M.A.; NEEMA, R.R. New chemically prepared - waste cooked tea based activated carbon: FTIR, XRD, AFM, and SEM spectroscopic studies. **International Journal of Research in Pharmacy and Chemistry**, v. 6, n. 2, p. 220-229, 2016.
- HO, Y.S.; MCKAY, G. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 76, n. 2, p. 332–340, 1998.
- JEPPU, A.G.; GIRISH, C.R.; PRABHU, B.; MAYER, K. Multi-component Adsorption Isotherms: Review and Modeling Studies. **Environmental Processes**, v. 10, artigo nº 38, 2023
- KALAM, S.; ABU-KHAMSIN, S.A.; KAMAL, M.S.; PATIL, S. Surfactant adsorption isotherms: a review. **ACS Omega**, v. 6, n. 48, p. 32342–32348, 2021.
- KOŁODYŃSKA, D.; WNETRZAK, R.; LEAHY, J.J.; HAYES, M.H.B.; KWAPIŃSKI, W.; HUBICKI, Z. Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 197, p. 295–305, 2012.
- LI, W.-B.; DENG, H.-Y.; YE, Y.; ZHOU, S.-N.; TOUQUEER, A.; OUYANG, J.-M.; KUANG, Q.; LIU, W. Effect of pH on the adsorptive and cycling performance of amphoteric clay-loaded biochar. **Desalination and Water Treatment**, v. 264, p. 111-120, 2022
- LI, Y.; ZHAO, B.; SHANG, T. Adsorption of copper(II) in biochar-humic acid–water system. **Scientific Reports**, v. 15, artigo número 24948, 2025.
- LIMA, V.F.; MERÇON, F. Metais Pesados no Ensino de Química. **Química Nova na Escola**, v. 33, n. 4, p. 199-205, 2011.
- LIMOUSY, L.; THIEBAULT, T.; BRENDLE, J. New Materials and Technologies for Wastewater Treatment. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1927, 2022.
- MACOMBER, L.; HAUSINGER, R.P. Mechanisms of nickel toxicity in microorganisms. **Metallomics**, v. 3, p. 1153-1162, 2011.
- MAGALHÃES, E.T.S.; ÁVILA, M.R.; WOHLBERG, J.; NUNES, O.M.; FONTOURA JÚNIOR, J.A.S.;

- QUADROS, E.S.; MENEGON, B. Resíduos de erva-mate na compostagem: uma abordagem sustentável para a economia circular e a agricultura. **Revista DELOS**, v. 18, n. 67, p. 1-14, 2025
- ÖZSİN, G.; KILIÇ, M.; APAYDIN-VAROL, E.; PÜTÜN, A.E. Chemically activated carbon production from agricultural waste of chickpea and its application for heavy metal adsorption: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. **Applied Water Science**, v. 9, artigo número 56, 2019.
- MOHAN, D.; PITTMAN JUNIOR., C.U. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri and hexavalent chromium from water. **Journal of Hazardous Materials**, n. 137, p. 762-811, 2006.
- MOREIRA, D.R. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. 2010. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica, Porto Alegre, 2010.
- MUSAH, M.; AZEH, Y.; MATHEW, J.T.; UMAR, M.T.; ABDULHAMID, Z.; MUHAMMAD, A.I. Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. **Caliphate Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2023.
- NGO, H.T.T.; NGUYEN, T.D.; NGUYEN, T.T.H.; LE, T.T.; NGUYEN, D.Q. Adverse Effects of Toxic Metal Pollution in Rivers on the Physiological Health of Fish. **Toxics**, v. 10, n. 9, p. 528, 2022.
- OLIVEIRA, J.P.R. **Estudo dos poluentes orgânicos persistentes (POPs) em regiões industriais da Grande São Paulo – via cromatografia a gás acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e captura de elétrons (GC-ECD)**. 2011. 209f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- OSHIIWA, M.; DORTA, C.; ALVES, W.S.; ROSSI, P.H.S.; OTOBONI, A.M.M.B.; GUTIERREZ, V.C.P.; IGNÁCIO, E.O.; FAVONI, S.P.G. Consumo do café especial no Brasil e sua exportação. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 10, p. 1-18, 2024.
- SANTOS, A.S.R.; MARTINS, R.F. Poluição: considerações ambientais e jurídicas. **Revista Imaes**, n. 5, p. 97-102, 2002.
- SILVA, C.M.S. **Síntese de nanoadsorventes e chars a partir da pirólise de bagaço de uva para fins de adsorção**. 2022. 153f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.
- SOUSA, A.G.; COSTA, T.H.M. Usual coffee intake in Brazil: results from the National Dietary Survey 2008–9. **British Journal of Nutrition**, v. 113, p. 1615–1620, 2015.
- THO, P.T.; VAN, H.T.; NGUYEN, L.H.; HOANG, T.K.; TRAN, T.N.H.; NGUYEN, T.T.; NGUYEN, T.B.H.; NGUYEN, V.Q.; SY, H.L.; THAI, V.N.; TRAN, Q.B.; SADEGHZADEH, S.M.; ASADPOUR, R.; THANG, P.Q. Enhanced simultaneous adsorption of As(III), Cd(II), Pb(II) and Cr(VI) ions from aqueous solution using cassava root husk-derived biochar loaded with ZnO nanoparticles. **RSC Advances**, v. 11, p. 18881-18897, 2021.
- UGWU, E.I.; AGUNWAMBA, J.C. A review on the applicability of activated carbon derived from plant biomass in adsorption of chromium, copper, and zinc from industrial wastewater. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122-132, 2020.
- ZANIN, V.; MEYER, L.G. Evolução da margem de comercialização da erva-mate no Rio Grande do Sul. **Revista iPecege**, v. 4, n. 1; p. 7-18, 2018
- WANG, B.; LAN, J.; BO, C.; BOLIN GONG, B.; OU, J. Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. **RSC Advances**, v. 13, p. 4275-4302, 2023.
- YU, Q.; XIA, D.; LI, H.; KE, L.; WANG, Y.; WANG, H.; ZHENG, Y.; LI, Q. Effectiveness and mechanisms of ammonium adsorption on biochars derived from biogas residues. **RSC Advances**, v. 6, p. 88373-88381, 2016.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rede Verzeri, mais especificamente ao Colégio Medianeira, por todo o apoio.

Tabela 1 – Dados dos processos de obtenção de adsorventes a partir da carbonização de erva-mate e pó de café.

Material base	Total carbonizado (g)	Massa de adsorvente (g)	Perda de massa (%)	Rendimento (%)
pó de café	64,1143	5,6105	91,2	8,75
erva-mate	78,3580	7,6060	90,3	9,71

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 4 – Dados utilizados para a determinação do modelo de adsorção exibido pelo adsorvente sintetizado a partir de erva-mate.

C_0 real de íons Ni^{+2} (mg/L)	C_e íons Ni^{+2} (mg/L)	q_e (mg/g)	C_e/q_e	$\log(C_e)$	$\log(q_e)$
15	14,0	0,2	70	1,146128	-0,69897
27	23,5	0,7	33,57143	1,371068	-0,1549
57	42,2	2,96	14,25676	1,625312	0,471292
83	49,3	6,74	7,31454	1,692847	0,82866
110	58,7	10,26	5,721248	1,768638	1,011147

Fonte: Autoria própria (2025)