



## Caracterização da turfa e seletividade de adsorção entre Cromo, Níquel, Cobre e Cádmio

Peat characterization and adsorption selectivity between Chromium, Nickel, Copper and Cadmium

V. M. M. Moraes<sup>1\*</sup>; M. C. F. Silva<sup>2</sup>; L. F. S. Ferreira<sup>1</sup>; I. C. Bellin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

\*vitoriamarighella@gmail.com

(Recebido em 17 de janeiro de 2025; aceito em 18 de agosto de 2025)

A crescente industrialização tem gerado uma quantidade cada vez maior de resíduos e contaminantes, especialmente na água. A crescente demanda por água doce, que já supera a estimativa de disponibilidade, soma-se à grave ameaça ambiental representada pela contaminação dos recursos hídricos por metais potencialmente tóxicos, corantes e outros produtos químicos. A adsorção é uma técnica eficiente e econômica para remover contaminantes da água. Ela consiste em utilizar materiais adsorventes, como a turfa, que possuem a capacidade de atrair e reter as substâncias poluentes em sua superfície. A turfa, um material orgânico formado pela decomposição de plantas em ambientes úmidos, apresenta características que a tornam um excelente adsorvente: alta porosidade, grande área superficial e presença de grupos funcionais que se ligam aos metais. O objetivo deste estudo foi caracterizar a turfa e avaliar seu desempenho na remoção de diferentes metais em um sistema competitivo. A turfa analisada apresentou características adequadas para a adsorção, como alta porosidade e presença de grupos funcionais. Os resultados mostraram que a turfa foi altamente eficiente na remoção de todos os metais estudados, com eficiência superior a 94%. A ordem de preferência de adsorção foi cádmio > níquel  $\approx$  cromo > cobre.

Palavras-chave: turfa, seletividade, metais.

Increasing industrialization has generated an ever-increasing amount of waste and contaminants, especially in water. The growing demand for fresh water, which already exceed the estimates of availability, is compounded by the serious environmental threat posed by the contamination of water resources by potentially toxic metals, dyes and other chemicals. Adsorption is an efficient and cost-effective technique for removing contaminants from water. It consists of using adsorbent materials, such as peat, which have the ability to attract and retain pollutants on their surface. Peat, an organic material formed by the decomposition of plants in humid environments, has characteristics that make it an excellent adsorbent: high porosity, large surface area, and the presence of functional groups that bind to metals. The objective of this study was to characterize peat and evaluate its performance in the removal of different metals in a competitive system. The peat analyzed presented characteristics suitable for adsorption, such as high porosity and the presence of functional groups. The results showed that peat was highly efficient in the removal of all the metals studied, with an efficiency higher than 94%. The order of adsorption preference was cadmium > nickel  $\approx$  chromium > copper.

Key words: peat, selectivity, metals.

### 1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial inaugurou um novo paradigma de desenvolvimento, e desde então, os modelos de produção em massa têm se expandido exponencialmente. Impulsionados por uma demanda incessante por inovação econômica e crescimento, esses modelos, especialmente em setores-chave como o têxtil, metalúrgico e plástico, geram uma vasta quantidade de subprodutos e resíduos. Consequentemente, a proliferação de efluentes químicos, metais potencialmente tóxicos, microplásticos e outros poluentes tornou-se uma característica intrínseca desse sistema, refletindo um crescimento que historicamente priorizou o avanço econômico em detrimento da sustentabilidade ambiental [1].

O avanço da sociedade industrializada, embora traga inovações, impõe um fardo pesado sobre os ecossistemas aquáticos. A contaminação da água por efluentes carregados de corantes, metais

potencialmente tóxicos, microrganismos nocivos e outros compostos químicos tornou-se uma consequência direta desse modelo de produção. Este problema é agravado por forças demográficas e ambientais, como o crescimento populacional que exige mais água para consumo e agricultura, o desenvolvimento econômico que intensifica a atividade industrial, e as mudanças climáticas que alteram os regimes de chuva e aumentam a frequência de secas. A convergência desses fatores cria um cenário insustentável, no qual Vedula e Yadav (2022) [2] estimam que, já em 2030, a demanda global por água doce excederá a oferta em 40%. Essa projeção não aponta apenas para a escassez, mas para uma crise hídrica iminente que ameaça à segurança alimentar, a saúde pública e a estabilidade socioeconômica global.

A remoção de substâncias contaminantes e subprodutos de águas residuais industriais e domésticas não é apenas uma possibilidade técnica, mas uma necessidade premente para a saúde dos ecossistemas. A seleção de um método de tratamento eficaz é uma tarefa complexa, que depende de uma análise criteriosa de múltiplos fatores. É crucial considerar as características intrínsecas da água a ser tratada, como seu pH, turbidez e carga orgânica, bem como a natureza específica dos contaminantes presentes, sejam eles metais potencialmente tóxicos, compostos orgânicos recalcitrantes ou patógenos. Além disso, todo o processo deve ser balizado pelos rigorosos requisitos regulatórios que definem os padrões de descarte. Frequentemente, uma única tecnologia é insuficiente para atingir o nível de purificação exigido, tornando necessária a integração de diferentes técnicas — como processos físicos, químicos e biológicos — em um sistema multietapas para garantir a máxima eficácia do tratamento e a efetiva proteção do meio ambiente [3].

A remediação de águas contaminadas emprega um arsenal de métodos, que são classicamente categorizados em processos físicos, químicos e biológicos. Os tratamentos físicos funcionam como uma primeira barreira, utilizando forças como a gravidade na sedimentação para remover sólidos suspensos, ou barreiras porosas na filtração. Em paralelo, o tratamento químico lança mão de reações, como a oxidação, para transformar quimicamente os poluentes em substâncias menos nocivas. Já o método biológico utiliza a capacidade metabólica de microrganismos para decompor a matéria orgânica, sendo um pilar no tratamento de efluentes domésticos. Contudo, para lidar com poluentes persistentes ou emergentes que resistem a essas etapas convencionais, recorre-se a tratamentos avançados, que incluem tecnologias como a osmose reversa e a adsorção [4].

A adsorção destaca-se como uma tecnologia avançada e amplamente aplicada, reconhecida por sua elevada eficiência na remoção de uma vasta gama de contaminantes. Seu prestígio é reforçado pela infraestrutura de baixo custo, excelente relação custo-benefício e facilidade de operação, manutenção e escalabilidade. Crucialmente, o processo não gera subprodutos tóxicos, que se fundamenta na adesão de adsorvatos à superfície de um adsorvente, seja por fisissorção (forças de van der Waals) ou quimissorção (ligações químicas), deste modo a escolha do adsorvente é vital, determinando a capacidade e seletividade do processo [5].

Na busca por soluções de tratamento de efluentes que sejam ao mesmo tempo eficazes e sustentáveis, a turfa emergiu recentemente como um adsorvente natural de notável proeminência. Este material tem sido amplamente utilizado para a remoção de uma gama diversificada de substâncias poluentes, demonstrando especial eficiência na captura de metais potencialmente tóxicos e corantes complexos provenientes de descargas industriais. A excepcional capacidade de adsorção da turfa origina-se de sua própria natureza: trata-se de um material orgânico, formado pela lenta e parcial decomposição de restos vegetais em ambientes úmidos e de baixo oxigênio, como as turfeiras. Essa gênese confere ao material uma estrutura físico-química única, caracterizada por uma elevada porosidade e uma vasta área superficial, que criam uma matriz ideal para a retenção de contaminantes. Além disso, sua composição é rica em grupos funcionais, como os carboxílicos e hidroxílicos, que atuam como sítios de ligação ativos, verdadeiras "âncoras" químicas que se ligam firmemente às moléculas dos poluentes, garantindo sua efetiva remoção da água [6].

A literatura científica tem consistentemente validado a capacidade da turfa como um adsorvente natural de alta eficiência para a remediação de águas contaminadas por metais potencialmente tóxicos. Estudos demonstram sua notável afinidade por cátions como chumbo ( $Pb^{2+}$ ), cádmio ( $Cd^{2+}$ ), cromo ( $Cr^{3+}$ ) e cobre ( $Cu^{2+}$ ). O mecanismo fundamental por trás dessa remoção reside na complexa interação química entre os íons metálicos dissolvidos e a abundância

de grupos funcionais ácidos na estrutura da turfa, principalmente os grupos carboxílicos (-COOH) e fenólicos (-OH). Em condições de pH adequadas, esses grupos se desprotonam, criando sítios de superfície com carga negativa (-COO<sup>-</sup>, -O<sup>-</sup>) que atraem eletrostaticamente os cátions metálicos. Essa interação se manifesta através de processos como troca iônica e quimiossorção, onde os metais são efetivamente sequestrados. A otimização deste processo, contudo, é sensível às condições operacionais, sendo a eficiência da adsorção diretamente influenciada por fatores como o pH da solução, a massa de adsorvente utilizada, o tempo de contato necessário para atingir o equilíbrio e a concentração inicial do metal [7].

O presente trabalho tem como objetivo central elucidar a seletividade da turfa em um sistema de adsorção competitivo, visando estimar a ordem de preferência de remoção entre diferentes metais. Para alcançar tal finalidade, o estudo se desdobra em duas frentes principais: primeiramente, uma caracterização físico-química detalhada da turfa para compreender suas propriedades adsorventes. Em segundo lugar, a aplicação da metodologia de planejamento fatorial para avaliar o desempenho do material. A escolha desta abordagem estatística é estratégica, pois permite não apenas investigar a influência de múltiplas variáveis simultaneamente, mas também otimizar o processo, minimizando o número de experimentos e o uso de recursos, ao mesmo tempo em que garante a acurácia e a robustez estatística dos resultados.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de turfa foram coletadas a uma profundidade de 0-20 cm da superfície do solo das turfeiras em São Cristóvão – SE (-10.920985, -37.102549), localizada a 5 km da capital do estado, Aracaju. As amostras foram secas em estufa com circulação de ar a uma temperatura de  $60 \pm 5$  °C até atingirem massa constante, ou seja, quando pesagens consecutivas, realizadas em intervalos regulares, indicaram que não havia mais perda de umidade significativa. Após a secagem, foram peneiradas em peneira com malha de 16 mesh e armazenadas [8].

### 2.1 Caracterização da turfa

O teor de umidade foi determinado usando a turfa *in natura*, que foi seca em balança de umidade Shimadzu, modelo MOC – 120H, até a variação da massa alcançar uma taxa de variação de 0,05 %, procedimento realizado em triplicata.

A determinação do teor de matéria orgânica, matéria inorgânica, cátions trocáveis e pH seguiu a metodologia descrita no Manual de métodos de análises de solo. - Embrapa [8], os valores da capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) e soma das bases (SB) foram obtidos por meio de cálculos.

Para as análises na região do infravermelho, foram utilizados espectros no espectrômetro FT-IR Spectrum Two da PerkinElmer, no laboratório do NEREES na SergipeTec. As amostras foram analisadas utilizando pastilhas de KBr e a varredura foi realizada na faixa espectral de 4000 cm<sup>-1</sup> a 450 cm<sup>-1</sup>, com uma resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e 20 varreduras por amostra.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi conduzida com o sistema MEV/EDS na Universidade Federal de São Carlos – DEMa – Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) - FEG. As amostras foram realizadas com o equipamento operando sob baixo vácuo, voltagem de aceleração de 15 kV e corrente de filamento de 1850 mA.

### 2.2 Ensaios de adsorção

Utilizando os parâmetros da Tabela 1, foi condicionado cada massa do adsorvente nas concentrações de metais indicados com seu respectivo pH, seguindo a metodologia de Charazińska et al. (2021) [7]. Após a batelada, as amostras foram submetidas a agitação de 150 rpm em temperatura ambiente. Após o tempo de sorção, as amostras foram filtradas com membrana de filtração de 0,43 µm. Para calcular a remoção dos íons metálicos, utilizou-se a equação seguindo a metodologia de Charazińska et al. (2021) [7]:

$$\%R = \frac{C_o - C_e}{C_o} \cdot 100 \quad \text{Sendo } C_o, \text{ concentração inicial e } C_e \text{ é a final.}$$

### 2.3 Planejamento fatorial da adsorção

Para avaliar estatisticamente a eficiência da turfa na remoção de metais, foi utilizado um planejamento fatorial completo  $2^3$ , utilizando o software Statistica versão 12, com três fatores: concentração do metal, influência do pH da solução e massa da turfa. Cada fator foi analisado em dois níveis codificados (-1 e +1), além de um ponto central (0), conforme detalhado na Tabela 1.

É importante destacar que as soluções utilizadas em todos os ensaios continham uma mistura simultânea dos quatro metais ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  e  $\text{Cd}^{2+}$ ), compondo um sistema competitivo. Essa abordagem foi adotada com o intuito de avaliar a seletividade da turfa em condições mais próximas de efluentes reais, nos quais múltiplas espécies metálicas coexistem e competem pelos sítios de adsorção.

Tabela 1 – Valores dos níveis codificados usados no planejamento fatorial.

| Fatores   | Níveis |     |     |
|---|--------|-----|-----|
|   | -1     | 0   | +1  |
| pH  | 3,5    | 6,0 | 8,5 |
| Concentração de cada metal ( $\text{mg L}^{-1}$ ) | 1,0    | 1,5 | 2,0 |
| Massa (g)   | 1,0    | 1,5 | 2,0 |

Nove ensaios foram necessários para realizar todas as combinações dos fatores propostos (Quadro 1). Os ensaios foram conduzidos com diferentes valores de pH, concentração e massa da turfa, utilizando 25 mL de solução mantida sob agitação mecânica a 150 rpm por 6 h a temperatura ambiente. Os resultados foram determinados por meio de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES), equipamento Thermo Scientific iCAP 7000, instalado no Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS). Para isso, utilizou-se a metodologia de Charanzinska et al. (2021) [7] com modificações, conforme referências [9, 10]. As amostras foram digeridas com solução de  $\text{HNO}_3$  e  $\text{HClO}_4$  em sistema de aquecimento nas temperaturas de  $130^\circ\text{C}$  a  $200^\circ\text{C}$  até a obtenção da solução límpida e depois foram filtradas utilizando filtro com membrana de  $0,45 \mu\text{m}$ . As condições operacionais foram: Gás plasma  $15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; gás auxiliar  $0,5 \text{ L}\cdot\text{min}$ ; nebulizador  $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; potência do plasma de 1300W, tipo de nebulizador cross-flow de quartzo e o tempo de leitura foi de 10 s por leitura [10]. Vale salientar que as curvas de calibração foram construídas a partir de soluções padrão multielementares com as concentrações do planejamento fatorial para obtenção do coeficiente de correlação linear nas seguintes linhas espectrais: Cd 226 nm, Cr 267 nm, Cu 324 nm e Ni 232 nm. Os limites de detecção foram de  $0,3 \mu\text{g L}^{-1}$  para o Cd e  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  para Cr, Cu e Ni [11].

Quadro 1 – Matriz do planejamento fatorial completo  $2^3$ .

| Ensaios | pH | Concentração | Massa |
|---------|----|--------------|-------|
| 1       | -1 | -1           | -1    |
| 2       | +1 | -1           | -1    |
| 3       | -1 | +1           | -1    |
| 4       | +1 | +1           | -1    |
| 5       | -1 | -1           | +1    |
| 6       | +1 | -1           | +1    |
| 7       | -1 | +1           | +1    |
| 8       | +1 | +1           | +1    |
| 9       | 0  | 0            | 0     |

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A turfa é um material orgânico proveniente da decomposição de substâncias químicas e biológicas derivado de restos vegetais, presentes em locais alagadiços [12]. A caracterização desse material foi realizada a partir da determinação do teor de matéria orgânica, teor de matéria inorgânica, teor de umidade e pH, os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de teor de matéria orgânica e inorgânica, umidade e pH da amostra de turfa coletada na profundidade de 0 – 20 cm.

| Amostra           | Teor de Matéria Orgânica (%) | Teor de Matéria Inorgânica (%) | Teor de Umidade (%) | pH   |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|------|
| Turfa (0 – 20 cm) | 29,82                        | 70,18                          | 68,60               | 5,00 |

Lima et al. (2022) [13] classificam a turfa como podendo ser considerada altamente ácida (pH abaixo de 4,5), moderadamente ácida (pH de 4,5 – 5,5), ligeiramente ácida (pH de 5,5 – 7,0) e básica (superior a 7,0). A turfa analisada está classificada como moderadamente ácida (pH 5) e está em conformidade com o valor encontrados na literatura [13] em turfas tropicais coletadas em Cravinhos/SP. O valor teor de umidade encontrado de 68,6 % corrobora com valores encontrados por Lima et al. (2022) [13], ao avaliarem dois pontos distintos de amostras de turfas coletadas na mesma profundidade (50 a 70 %). O teor de matéria orgânica identificado na amostra de turfa analisada foi de 29,82 %, os valores encontrados por Lima et al. (2022) [13] para a profundidade de 0 - 20 cm foi de 39 % a 43 %, sendo considerados abaixo da média. Em contrapartida a amostra de turfa trabalhada por Crescêncio Júnior (2008, citado por Lima et al., 2022) [13] coletada em Resende/RJ apresentou teor de matéria orgânica de 32,5% e foi obtido experimentalmente uma maior capacidade de retenção de cádmio, comprovando que outros fatores podem tem sido mais importante que a matéria orgânica na imobilização desse material.

A capacidade de troca catiônica de um material diz respeito a quantidade de cátions que este pode adsorver e trocar. A força que faz um cátion ser atraído está relacionado a sua carga iônica, logo, íons com maior valência são mais fortemente atraídos pelo material [14]. A Tabela 3 mostra os valores encontrados para sódio, potássio, cálcio+magnésio e alumínio, obtidos experimentalmente, assim como a soma das bases (SB) e a capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) obtidos por cálculos.

Tabela 3 – Valores de sódio, potássio, cálcio, magnésio, alumínio. SB = somas das bases e CTC = capacidade de troca de cátions efetiva, em mmolc L<sup>-1</sup>.

| Na<br>(mmolc L <sup>-1</sup> ) | K<br>(mmolc L <sup>-1</sup> ) | Ca+Mg<br>(mmolc L <sup>-1</sup> ) | Al<br>(mmolc L <sup>-1</sup> ) | SB<br>(mmolc L <sup>-1</sup> ) | CTC<br>(mmolc L <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| média (desvio padrão)          |                               |                                   |                                |                                |                                 |
| 0,7040<br>(0,1900)             | 0,3363<br>(0,0650)            | 1,7958<br>(0,1973)                | 0,0185<br>(0,0000)             | 2,8361                         | 2,8546                          |

De Oliveira et al. (2021) [15] reportaram valores de capacidade de troca de cátions (CTC) entre 0,8 e 1,0 mmolc L<sup>-1</sup> em solos da bacia hidrográfica do médio curso do rio Teles Pires, classificando-os como de boa qualidade. Comparativamente, a amostra de turfa analisada neste estudo apresentou um valor superior de CTC (2,8546 mmolc L<sup>-1</sup>), indicando um potencial ainda mais elevado para processos de adsorção.

As imagens resultantes da microscopia eletrônica de varredura (Figura 1) foram produzidas com magnificação de 600 x da amostra de turfa *in natura*, sendo possível observar a irregularidade do material e a presença de macroporos, assim como relatam Rezanezhad et al. (2016) [16].

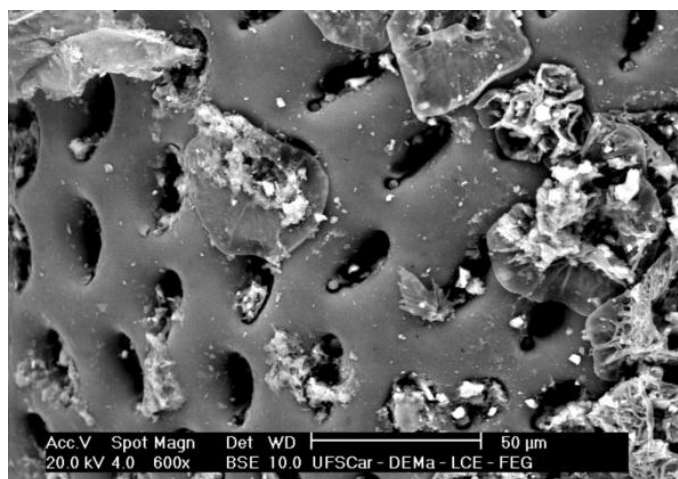


Figura 1 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da turfa in natura, micrografia 50  $\mu\text{m}$  – magnificação de 600x.

As micrografias eletrônicas de varredura indicam a existência de uma superfície rugosa e porosa com presença de macroporos, sugerindo uma morfologia favorável à adsorção dos cátions metálicos [3,17].

Segundo Nunes e Rezende (2022) [18,19], a interação turfa-metal realiza-se devido as Substâncias Húmicas presentes na turfa que possuem capacidade complexante entre elementos ou substâncias. Essa interação é promovida principalmente pela presença de grupos funcionais na estrutura da turfa, como carboxilas, fenóis e hidroxilas, que atuam como sítios ativos para a ligação com os íons metálicos. Como as substâncias húmicas presentes na turfa são formadas por uma complexa matriz de constituintes orgânicos, sedimentos, resíduos vegetais e produtos do metabolismo microbiano, há constante formação e disponibilização desses grupos funcionais, o que confere ao material uma elevada capacidade de complexação e troca iônica, favorecendo sua eficiência como adsorvente.

Para identificar quais grupos funcionais foram essenciais no estímulo da adsorção, foi realizado a análise de espectroscopia vibracional de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (Figura 2).

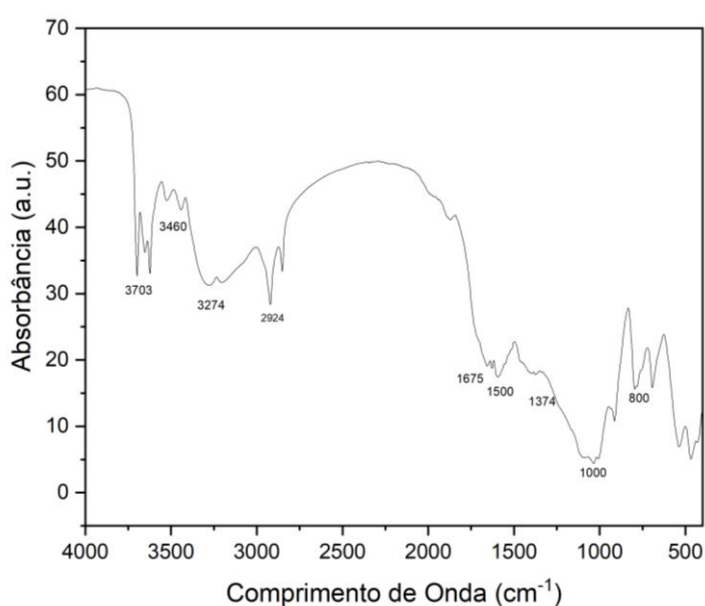


Figura 2 – Espectro vibracional do infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) da turfa, faixa espectral entre 4000  $\text{cm}^{-1}$  a 450  $\text{cm}^{-1}$ .

Nos espectros FT-IR da amostra da turfa, foi observado um pico de comprimentos de onda em  $3274\text{ cm}^{-1}$  que segundo, Aljumaili e Abdul-Aziz (2023) [3] mostram a existência do grupo OH, presentes em compostos fenólicos, bem como foram observados novos picos em  $2924\text{ cm}^{-1}$  indicando a formação de C-H de aldeído [19], os picos em  $1675\text{ cm}^{-1}$  estão diretamente relacionados ao estiramento C=O em cetonas, enquanto os picos em  $1500\text{ cm}^{-1}$  foram causados pelo forte estiramento C=C [3].

O pico na região  $1000\text{ cm}^{-1}$  foi atribuído ao possível estiramento do éter C-O-C [20]. A faixa de comprimento de onda de  $1374\text{ cm}^{-1}$  pode demonstrar a existência do estiramento da ligação C-N presente em composto de amina [3]. Nitidamente a turfa possui em sua superfície os grupos funcionais necessários para suceder a reação de adsorção.

Os ensaios de adsorção foram realizados utilizando o planejamento fatorial visando avaliar o comportamento da turfa frente a variação dos parâmetros que poderiam influenciar sua capacidade de adsorção assim como seu desempenho em condições de competição, em um ambiente com a presença de diversos metais, como: cromo, níquel, cobre, cádmio.

Os resultados de remoção percentual dos metais nos diferentes ensaios de adsorção estão apresentados na Tabela 4. As combinações experimentais seguem o planejamento fatorial previamente descrito na Tabela 1.

*Tabela 4 – Valores de remoção correlacionado com os respectivos ensaios de adsorção proveniente do planejamento fatorial.*

| Ensaio | pH | Concentração | Massa | Cromo     | Níquel | Cobre | Cádmio |
|--------|----|--------------|-------|-----------|--------|-------|--------|
|        |    |              |       | % Remoção |        |       |        |
| 1      | -  | -            | -     | 98,21     | 100,00 | 98,26 | 98,69  |
| 2      | +  | -            | -     | 95,17     | 95,79  | 96,24 | 97,63  |
| 3      | -  | +            | -     | 98,48     | 96,24  | 98,76 | 96,89  |
| 4      | +  | +            | -     | 94,85     | 96,73  | 95,27 | 98,87  |
| 5      | -  | -            | +     | 100,00    | 100,00 | 99,49 | 100,00 |
| 6      | +  | -            | +     | 100,00    | 100,00 | 99,39 | 100,00 |
| 7      | -  | +            | +     | 99,46     | 98,69  | 99,34 | 99,26  |
| 8      | +  | +            | +     | 100,00    | 100,00 | 99,19 | 100,00 |
| 9      | 0  | 0            | 0     | 100,00    | 99,21  | 98,64 | 98,27  |

Os valores referentes aos ensaios 5 e 6 obtiveram valores muito semelhantes para todos os metais avaliados, indicando que, para condições com uma alta concentração de massa da turfa para uma solução com baixa concentração de metais disponíveis, a variação do pH não foi significativa.

Os ensaios 1, 8 e 9, que estão agrupados com todos os parâmetros com a mesma codificação, sendo o ensaio 1 com todos os parâmetros codificado no ponto inferior (pH 3,5, concentração do metal  $1\text{ mg L}^{-1}$  e massa 1 g), ensaio 8 no ponto superior (pH 8,5, concentração  $2\text{ mg L}^{-1}$  e massa 2 g) e o ensaio 9 codificados com o ponto central (pH 6,0, concentração  $1,5\text{ mg L}^{-1}$  e massa 1,5 g). No ensaio 1, o níquel obteve 100 % de remoção enquanto os outros metais variam em algumas casas em 98%, já no ensaio 9 foi possível observar que houve um aumento para o cromo e para o cobre, enquanto para o níquel e cádmio foi registrado uma pequena queda. Ao avaliar o cenário do ensaio 8, o cromo se manteve constante enquanto os outros metais também aumentaram sua porcentagem de remoção.

Do ponto de vista ambiental, o ensaio 9 foi considerado o mais representativo para simular uma possível aplicação prática. Isso se deve ao fato de que as condições empregadas (pH levemente ácido a neutro, concentração intermediária de metais potencialmente tóxicos e uma dosagem viável de adsorvente), se assemelham às encontradas em efluentes industriais reais. Além disso, o sistema competitivo utilizado reflete a presença simultânea de diferentes íons metálicos no meio, permitindo avaliar a seletividade de adsorção da turfa em um cenário mais realista.

A Figura 2 ilustra um gráfico comparativo da porcentagem de remoção de todas as espécies metálicas analisadas relacionando os ensaios com variação de parâmetros. É possível perceber a preferência da turfa em adsorver o cádmio em todos os cenários estudados, pois os resultados obtidos para esse metal apresentaram menor variação. O cobre foi o metal que menos foi adsorvido pela turfa, se sobressaindo dos demais metais apenas no ensaio 3 (pH 3,5, concentração  $2 \text{ mg L}^{-1}$  e massa 1 g). Os dados encontrados estão de acordo com resultados apresentados por Otaviano et al. (2020) [10] e Cho et al. (2014) [9,10], evidenciando que em um sistema de adsorção a turfa preferencialmente obedece a ordem  $\text{Cd} > \text{Cu}$ .

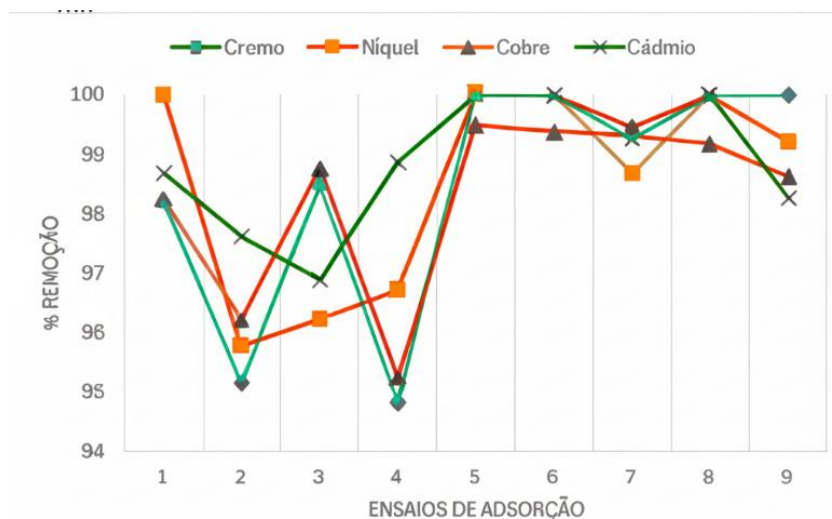


Figura 2 – Porcentagem de remoção pelos ensaios de adsorção para todos os metais (cromo, níquel, cobre, cádmio).

O níquel apresentou uma maior remoção no ensaio 1, onde foi utilizado pH 3,5,  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de concentração do metal e 1 g de massa, sendo observada uma diminuição na porcentagem de remoção no ensaio 2 para 95,79 % quando esses parâmetros foram alterados para pH 8,5,  $1 \text{ mg L}^{-1}$  e 1 g, esse efeito (influência do pH) foi observado em todos os metais nas condições de massa em 1 g e concentração em  $1 \text{ mg L}^{-1}$ . Na presença de uma concentração maior dos metais ( $2 \text{ mg L}^{-1}$ ) esse efeito do pH não é notado da mesma forma, nos ensaios 4 e 5, há o mesmo valor para concentração do metal e massa da turfa ( $2 \text{ mg L}^{-1}$  e 1 g), variando com pH 3,5 e 8,5, respectivamente, no qual não foi observado o mesmo efeito que nos ensaios 1 e 2 para todos os metais, apenas cromo e cobre se comportam da mesma forma (cai a porcentagem de remoção ao variar o pH em um sistema com pouco disponibilidade de adsorvente), e o níquel e cádmio sofrem um aumento.

A Figura 3 apresenta os gráficos de superfície de respostas agrupando os resultados isolados de cada metal para concentração e pH em função da remoção, com massa da turfa fixada no ponto central (1,5 g). Para todos os metais, os ensaios com pH ajustado em 3,5 obtiveram os melhores resultados de porcentagem de remoção. O cromo e o cobre apresentaram comportamentos semelhantes com diferentes intensidades em relação à porcentagem de remoção dos metais, para ambos, à medida que atingia o pH 8,5 a capacidade de remoção para esses metais diminuía.



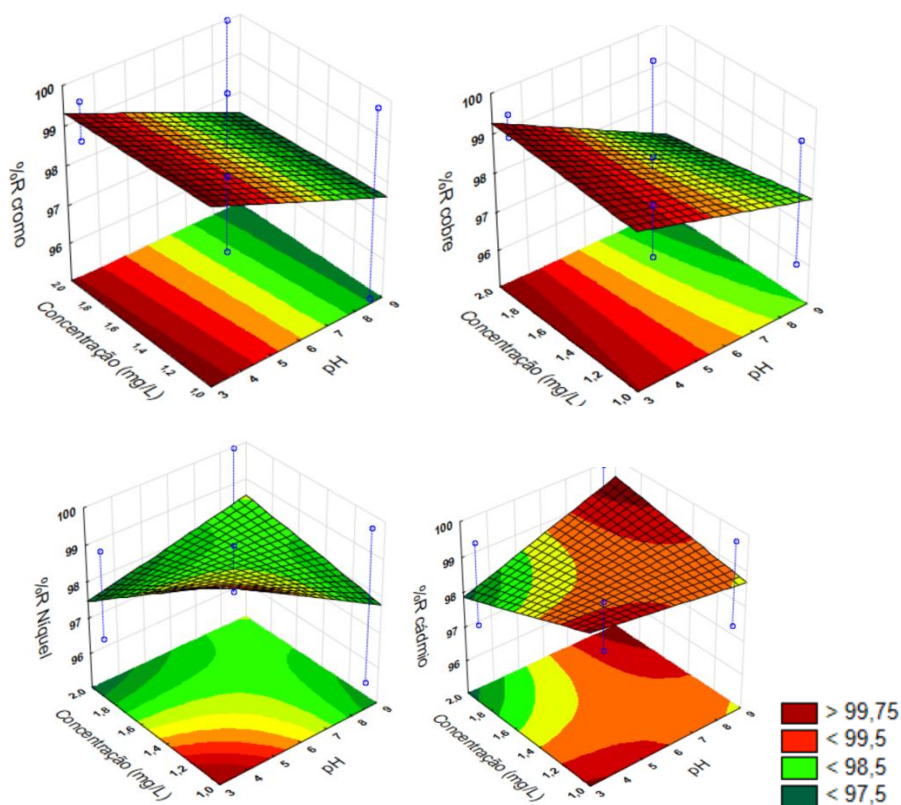


Figura 3 – Superfície de resposta da concentração e pH em função da % remoção de remoção de cada metal (cromo, níquel, cobre e cádmio), como massa fixada no ponto central (1,5 g).

A análise das superfícies de resposta para remoção de  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  e  $\text{Cd}^{2+}$  demonstrou que a turfa apresentou comportamento seletivo frente às diferentes espécies metálicas, ainda que todas tenham alcançado percentuais elevados de remoção (>95%) em grande parte das condições experimentais. No entanto, observaram-se tendências distintas conforme o metal analisado, indicando efeitos das propriedades físico-químicas dos cátions e das condições do meio (pH e concentração) sobre a eficiência do processo.

Para o cromo, a remoção foi alta e relativamente constante, independentemente do pH e da concentração, sugerindo baixa sensibilidade às variáveis testadas. Esse comportamento pode ser associado à elevada afinidade do cromo por sítios funcionalizados com grupos oxigenados, mas também à sua tendência a formar complexos hidroxilados e precipitados a pH mais elevados. Embora a referência de Sum et al. (2019) [22] tenha demonstrado a rejeição de cromo em membranas ricas em grupos amina (por repulsão eletrostática e exclusão de tamanho), outras abordagens adsorptivas baseadas em materiais porosos, como os MOFs, confirmam sua eficiente remoção [23]. Assim, a constância observada pode indicar que a turfa apresenta capacidade de saturação precoce para  $\text{Cr}^{3+}$  ou que sua interação ocorre de forma menos dependente do pH.

O cobre também apresentou elevada eficiência de remoção, mas com leve tendência de redução em pH mais alcalino. Esse resultado é consistente com o comportamento descrito por Sum et al. (2019) [22], que observaram forte adsorção seletiva de cobre em superfícies funcionalizadas com aminas em pH 4, atribuindo tal afinidade ao conceito de ácidos e bases duros e moles (HSAB). Como cobre é considerado um ácido de Lewis intermediário-duro, ele apresenta alta densidade de carga e forte coordenação com grupos doadores de elétrons (oxigênio ou nitrogênio), especialmente em pH ligeiramente ácido. Em pH mais elevado, pode haver competição com espécies hidroxiladas ou formação de complexos menos favoráveis à adsorção. Essa explicação é compatível com os dados obtidos por Iles et al. (2024) [24], que observaram capacidade de adsorção de cobre de até 787,4 mg/g em nanocompósitos à base de carvão ativado e magnetita, com estrutura porosa e sítios negativamente carregados características também presentes na matriz orgânica da turfa.

Já o comportamento do níquel foi fortemente dependente do pH, com aumento significativo da remoção em pH 8,5, especialmente nas menores concentrações. Isso se explica pelo fato de que, em pH 3,5, há competição entre  $H^+$  e  $Ni^{2+}$  pelos sítios ativos da turfa. À medida que o pH aumenta, os grupos funcionais da matriz se desprotonam (carboxilas, fenóis), aumentando a disponibilidade de sítios negativos e favorecendo a complexação com  $Ni^{2+}$ . A literatura sustenta esse padrão: no estudo de Ramos et al. (2016) [11], o níquel apresentou alta capacidade de adsorção em materiais lignocelulósicos modificados (0,932 mmol/g), com adsorção descrita pelo modelo de Langmuir e regida por pseudo-segunda ordem, o que reforça o caráter específico e dependente da carga dos sítios de ligação.

O caso do cádmio foi o mais particular entre os metais avaliados, apresentando altos percentuais de remoção tanto em pH 3,5 com baixa concentração, quanto em pH 8,5 com alta concentração. Tal padrão pode ser explicado pelo maior raio iônico e menor densidade de carga do  $Cd^{2+}$ , que o classificam como um ácido mole no modelo HSAB. Isso favorece sua interação com grupos funcionais também de caráter mole, como os presentes na turfa (carboxilas parcialmente protonadas ou fenóis), mesmo em pH 3,5. Em pH 8,5, o aumento da desprotonação dos sítios ativos também favorece a complexação, especialmente quando há maior disponibilidade do metal na solução.

A elevada afinidade da turfa pelo íon  $Cd^{2+}$  pode ser diretamente associada aos dados de caracterização obtidos. A presença expressiva de grupos funcionais oxigenados, como carboxilas, fenóis e cetonas (Figura 2), fornece sítios de complexação favoráveis à interação com cátions classificados como ácidos moles, como o cádmio. Além disso, o valor de pH da turfa (5,0) e a alta CTC sugerem uma superfície com moderada disponibilidade de cargas negativas, promovendo a retenção de  $Cd^{2+}$  mesmo em ambientes levemente ácidos. Tais fatores, combinados com a estrutura porosa observada nas micrografias eletrônica de varredura (Figura 1), conferem à turfa uma seletividade intrínseca ao cádmio, superando os demais metais nas condições avaliadas.

A importância dos fatores pH, concentração ( $mg\ L^{-1}$ ) e massa (g) foi analisada por meio do diagrama de Pareto (Figura 4), permitindo avaliar a significância estatística dos efeitos principais (massa, pH e concentração) e das interações entre eles (como  $1 \times 2$ ,  $1 \times 3$  e  $2 \times 3$ ) adotando um nível de significância de 95,0 %.

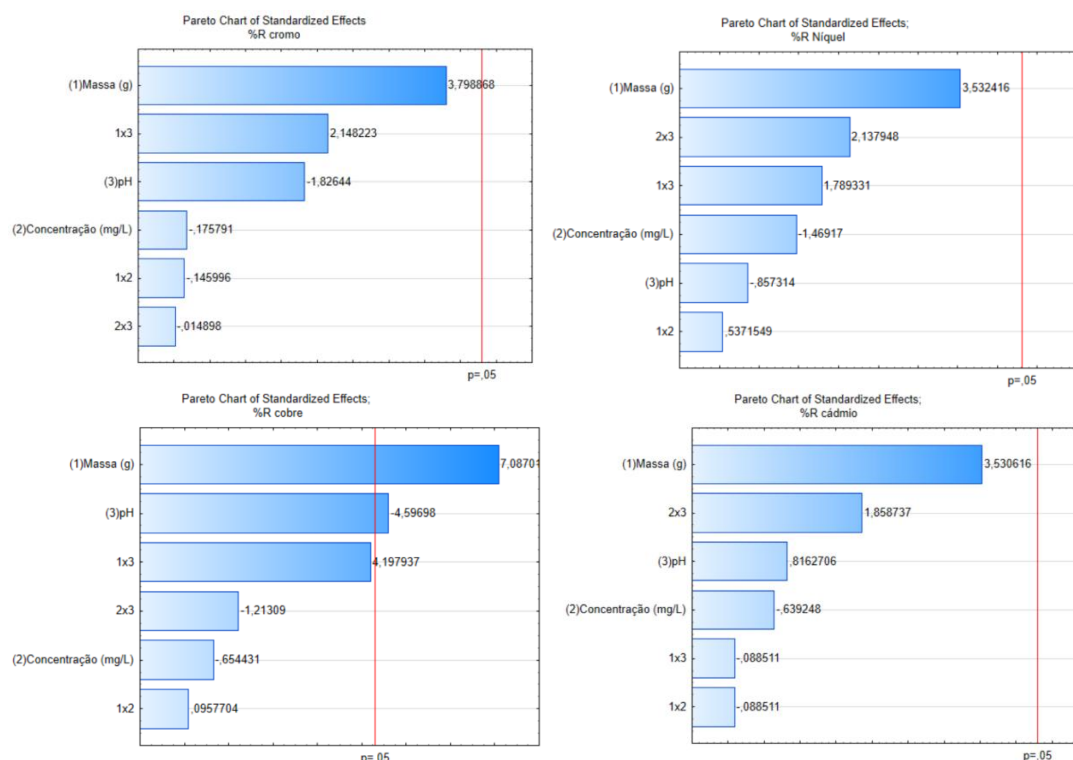


Figura 4 - Diagrama de Pareto para procedimento de adsorção dos metais com a turfa.

Foi observado que a variável massa do adsorvente foi o fator que mais impactou a eficiência de remoção para todos os metais avaliados, sendo estatisticamente significativa (acima da linha de  $p = 0,05$ ) para cromo, níquel, cobre e cádmio. Isso indica que o aumento da massa de turfa está diretamente relacionado à maior disponibilidade de sítios ativos para adsorção.

A variável pH também influenciou o processo, especialmente como fator isolado ou em interação com a massa ( $1 \times 3$ ) e com a concentração ( $2 \times 3$ ), com destaque para os metais cobre e cádmio. Tais interações indicam que o comportamento da turfa frente aos diferentes metais é sensível às variações simultâneas desses parâmetros.

Para o cobre, além da massa, os efeitos do pH (principal e interações) se destacaram, com todos os efeitos estatisticamente significativos, sugerindo um comportamento mais sensível a variações do meio. Isso pode estar relacionado à maior instabilidade do cobre em solução em diferentes faixas de pH, alterando sua forma química e, conseqüentemente, sua afinidade pela superfície da turfa.

Em contraste, o níquel e o cromo apresentaram menor sensibilidade às interações, sendo a massa o fator isolado predominante. Para o cádmio, observou-se também efeito significativo da interação massa  $\times$  concentração ( $2 \times 3$ ), sugerindo sinergia entre maior dose de adsorvente e aumento na carga metálica.

Esses resultados reforçam a necessidade de considerar não apenas os efeitos individuais dos fatores operacionais, mas também suas interações, especialmente quando se busca aplicar esses materiais em condições reais, onde múltiplos parâmetros variam simultaneamente.

#### 4. CONCLUSÃO

Com base nas análises de caracterização realizadas foi determinado que apesar do teor de matéria orgânica ser considerado baixo, a turfa apresentou morfologia porosa, alta capacidade de troca de cátions e presença de diversos grupos funcionais que possibilitaram a adsorção. A turfa apresentou alta eficiência de adsorção, obtendo resultados superiores a 94 % para todos os metais analisados (Cd, Ni, Cr e Cu). Em sistemas com alta quantidade de massa de turfa mesmo variando a concentração do metal e o pH, não houve nenhuma influência significativa (ensaios 5 a 8). Nos ensaios realizados com menor massa de turfa (ensaios 1 a 4), observou-se que o pH teve influência direta na adsorção de todos os metais avaliados, reduzindo a eficiência de remoção em geral. No entanto, ao se variar simultaneamente o pH e a concentração dos metais nessas condições de baixa dosagem de adsorvente, foi possível identificar um aumento na remoção do cádmio e do níquel, enquanto o cobre e o cromo apresentaram queda na eficiência de adsorção. Esses resultados indicam uma ordem de preferência da turfa pelos metais na seguinte sequência:  $\text{Cd} > \text{Ni} \approx \text{Cr} > \text{Cu}$ , refletindo tanto a afinidade do material quanto o comportamento competitivo entre os íons metálicos em condições limitadas de sítios ativos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (Fapitec/SE) pelo apoio financeiro, à SergipeTec e ao Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS) e ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) presente na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelas análises realizadas, ao Departamento de Química da Universidade Federal de Sergipe (DQI/UFS) pela infraestrutura disponível do Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM).

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Katheresan V, Kansedo J, Lau SY. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *J Environ Chem Eng.* 2018 Aug;6(4):4676-97. doi: 10.1016/j.jece.2018.06.060
2. Vedula SS, Yadav GD. Wastewater treatment containing methylene blue dye as pollutant using adsorption by chitosan lignin membrane: Development of membrane, characterization and kinetics of adsorption. *J Indian Chem Soc.* 2022 Jan;99(1):100263. doi: 10.1016/j.jics.2021.100263

3. Aljumaili MMN, Abdul-Aziz YI. High surface area peat moss biochar and its potential for Chromium metal adsorption from aqueous solutions. *S Afr J Chem Eng.* 2023 Oct;46:22-34. doi: 10.1016/j.sajce.2023.06.006
4. Natarajan S, Bajaj HC, Tayade RJ. Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process. *J Environm Sci.* 2018;65:201-22. doi: 10.1016/j.jes.2017.03.011
5. Poddar K, Sarkar D, Sarkar A. Norfloxacin adsorption by torrefied coco peat biochar as a novel adsorbent in a circular economy framework. *Environ Res.* 2024;251:118711. doi: 10.1016/j.envres.2024.118711
6. Usman M, Luo G, Gamal El-Din M. Sustainable bioenergy potential of peat-moss derived hydrothermal aqueous phase: Insights into methane production and organic transformation. *Bioresour Technol.* 2025 Jan;415:131662. doi: 10.1016/j.biortech.2024.131662
7. Charazińska S, Lochyński P, Burszta-Adamiak E. Removal of heavy metal ions from acidic electrolyte for stainless steel electropolishing via adsorption using Polish peats. *J Water Process Eng.* 2021;42:102169. doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102169
8. Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Guimarães MF, editors. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília (DF): Embrapa; 2017.
9. Otaviano JJS, Nascimento JM, Pereira de Sousa JR, Oliveira JD. Adsorção simultânea e competitividade de cádmio e cobre em solos naturais e antropizados da cidade de Cajapió, Baixada Maranhense. *Rev Ibero-Americana Ciênc Amb.* 2020 Jun;11(5):510-8. doi: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0046
10. Ahmad Z, Gao B, Mosa A, Yu H, Yin X, Bashir A, et al. Removal of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by biochars derived from potassium-rich biomass. *J Clean Prod.* 2018 Apr;180:437-49. doi: 10.1007/s11356-015-5486-3
11. Cho Y, Kim S, Park H, Komarneni S, Hong Y. Removal of inorganic pollutants in rainwater by a peat-derived porous material. *J Porous Mat.* 2014;21(4):387-94. doi: 10.1007/s10934-014-9784-9
12. Ramos SNC, Xavier ALP, Teodoro FS, Gil LF, Gurgel LVA. Removal of cobalt(II), copper(II), and nickel(II) ions from aqueous solutions using phthalate-functionalized sugarcane bagasse: Mono- and multicomponent adsorption in batch mode. *Ind Crops Prod.* 2016 Jan;79:116-30. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.10.035
13. Vieira EM, Diniz DDBFPL. *Substâncias húmicas e matéria orgânica natural*. São Carlos (SP): RiMa; 2017.
14. Lima JZ, Marques JP, Sígolo JB, Rodrigues VGS. Caracterização de turfa tropical visando avaliar seu potencial como sorvente de baixo custo para elementos potencialmente tóxicos. *COBRAMSEG.* 2022. 2022 Oct;8054-61. doi: 10.4322/cobramseg.2022.1014
15. De Aguiar MRMP, Novaes AC, Guarino AWS. Removal of heavy metals from wastewaters by aluminosilicate. *Quim Nova.* 2002 Dec;25(6b):1145-54. doi: 10.1590/S0100-40422002000700015
16. De Oliveira AS, Pierangeli MAP, De Sousa JB, Lopes HSS, Galbiati C, De Souza CA, et al. Caracterização morfológica, física e química de solos da bacia hidrográfica do médio curso do rio Teles Pires, no Município de Alta Floresta - MT. *Res Soc Develop.* 2021 Jul 28;10(9):e34210918157.
17. Rezanezhad F, Price JS, Quinton WL, Lennartz B, Milojevic T, Van Cappellen P. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. *Chem Geol.* 2016 Jul;429:75-84. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.03.010
18. Morais VLM, Alsina OLS, Gomes WC. Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. *Rev Eletr Mat Proc.* 2007 Apr;2(1):27-32. 19. Nunes RR, Resende MOO. *O solo: estrutura e composição*. São Carlos (SP): Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo; 2022.
20. Lee SJ, Park JH, Ahn YT, Chung JW. Comparison of heavy metal adsorption by peat moss and peat moss-derived biochar produced under different carbonization conditions. *Water Air Soil Pollut.* 2015 Feb;226(2):1-11. doi: 10.1007/s11270-014-2275-4
21. Ahmed MB, Hasan Johir MA, Zhou JL, Ngo HH, Nghiem LD, Richardson C, et al. Activated carbon preparation from biomass feedstock: Clean production and carbon dioxide adsorption. *J Clean Prod.* 2019 Jul;225:405-13. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.342
22. Sum JY, Ahmad AL, Seng OB. Selective separation of heavy metal ions using amine-rich polyamide TFC membrane. *J Ind Eng Chem.* 2019 Aug;76:277-87. doi: 10.1016/j.jiec.2019.03.052
23. Mubarak AS, Salih SS, Kadhom M, Ghosh TK. Removal of heavy metals from contaminated water using Metal-Organic Frameworks (MOFs): A review on techniques and applications. *Mat Sci Eng: B.* 2025 May;315:118105. doi: 10.1016/j.mseb.2025.118105
24. Iles A, Zaoui F, Elhadj Daouadji B, Zorgani MA, Siddig LA, Abdelhamid AS, et al. Removal of pollutants by olive stones-derived activated carbon@Fe3O4 nanocomposites: Effect of calcination

temperature on adsorption properties. J Water Process Eng. 2024 Sep;66:105960. doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105960