

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Temas Emergentes em Sustentabilidade

Produção de adsorvente a partir da casca de amendoim para remoção de cromo hexavalente de águas residuais

Peanut shell adsorbent production for wastewater hexavalent chromium removal

Isabela Garcia Da Rocha, Gabriela Carvalho Collazzo, Tais Werle, Thais Christine Amoedo Ferreira e Vania

Regina Gabbi Polli

RESUMO

Biochar foi preparado a partir de resíduo de casca de amendoim por meio de pirólise, após caracterizado e em seguida estudado como uma alternativa de baixo custo para a remoção de cromo hexavalente de águas residuais. O biochar apresentou uma estrutura micro-macroporosa e $326,5 \text{ m}^2 / \text{g}$ de área de superfície. Os estudos de adsorção foram realizados em temperatura ambiente e pH 2.5. Os dados experimentais foram ajustados a dois modelos diferentes de isotermas de adsorção, Langmuir e Freundlich. Entre os dois, o modelo de Langmuir apresentou melhor ajuste, com alto coeficiente de determinação (R^2) de 0,9843 e baixo erro médio percentual relativo (ARE%) de 7,8%, os quais indicam boa correlação. A capacidade máxima de adsorção (qm) para o material também foi determinada e seu valor foi de aproximadamente 33.8 miligramas de Cr (VI) por grama de adsorvente. Esses resultados indicam que a aplicação do biochar no tratamento de águas residuais contaminadas com cromo hexavalente é interessante. Além dos resultados favoráveis de adsorção, a fonte do biochar, um resíduo, está associada a menores custos de produção e também pode ser vista como ambientalmente interessante, pois fornece aplicação a um resíduo geralmente descartado.

Palavras-Chave: Adsorção, biochar, casca de amendoim, Cr (VI), cromo hexavalente

ABSTRACT

Biochar was prepared from peanut shell residue through pyrolysis then characterized and later studied as a low-cost alternative for wastewater hexavalent chromium removal. The biochar presented a micro-macroporous structure and $326.5 \text{ m}^2/\text{g}$ of surface area. The adsorption studies were performed at room temperature and pH 2.5. The experimental data were fitted to two different isothermal adsorption models, Langmuir and Freundlich. Amongst the two, Langmuir model presented a better fit, with a high determination coefficient (R^2) of 0.9843 and low percentual average relative error (ARE%) of 7.8%, which both indicate a good correlation. The maximum adsorption capacity (qm) for the material was also determined and its value was of approximately 33.8 milligrams of Cr (VI) per gram of adsorbent. These results indicate that the biochar's application for the treatment of hexavalent chromium contaminated wastewater is interesting. Besides the favorable adsorption results, the source of the biochar, a residue, is associated to lower production costs and could also be viewed as environmentally interesting for it provides application to a residue usually discarded.

Keywords: Adsorption, biochar, Cr (VI), hexavalent chromium, peanut shell

PRODUÇÃO DE ADSORVENTE A PARTIR DA CASCA DE AMENDOIM PARA REMOÇÃO DE CROMO HEXAVALENTE DE ÁGUAS RESIDUAIS

1 INTRODUÇÃO

O cromo, seja na forma metálica ou em produtos derivados, como sais, complexos e ligas, possui diversas aplicações nas mais diversas indústrias, destacando sua utilização no processamento de couro, na indústria têxtil, na fabricação de ligas metálicas, galvanização, produção de componentes eletrônicos, entre outros (NGUYEN *et al*, 2019). Esse metal pode ser encontrado na natureza em dois estados de oxidação principais, Cr (VI) e Cr (III), sendo a forma hexavalente a mais tóxica (MURUGAVELH *et al*, 2012).

Assim como os demais metais pesados, o cromo é não-biodegradável e tóxico aos seres humanos. Diversos tipos de câncer além de lesões graves de pele foram associados à exposição a esse metal (PRADHAN *et al*, 2017; DENG *et al*, 2019). A contaminação pode ocorrer através de alimentos, água ou pelo ar (SHANG *et al*, 2016), com atenção especial às fontes hídricas. Efluentes de indústrias que utilizam Cr (VI) nos processos produtivos são uma das principais fontes de contaminação dos recursos hídricos com cromo (PRADHAN *et al*, 2017). Por essa razão e devido à toxicidade do Cr (VI) se faz necessário o controle das concentrações desse metal em águas residuais.

Diversos métodos podem ser utilizados para a remoção do cromo hexavalente da fase aquosa, dentre eles destaca-se ultrafiltração, tratamento por membranas, eletrocoagulação, troca iônica. Entretanto, custos e dificuldades de implementação restringem a utilização desses métodos. Nesse contexto, a adsorção vem sendo amplamente estudada como uma alternativa mais barata e acessível para a remoção de Cr (VI) e outros poluentes de meios hídricos (KHELAIPIA *et al*, 2016). Dentro dessa área, tem ganhado destaque a utilização de biochar como material adsorvente. Por definição, biochar é um sólido rico em carbono (65-90%) produzido a partir da pirólise de biomassa que contém grupos funcionais oxigenados e aromáticos e grande quantidade de poros (QAMBRANI *et al*, 2017).

No presente trabalho objetivou-se analisar o desempenho de biochar produzido a partir da casca de amendoim na remoção por adsorção de cromo hexavalente de águas residuais simuladas. O amendoim é uma oleaginosa bastante produzida mundialmente e, devido a seu grande percentual de gordura, é bastante utilizada industrialmente em diversos produtos como óleos, farelos, tintas, etc. A casca é o principal resíduo dessa produção e representa entre 25 e 30 % do peso total do vegetal, a qual é majoritariamente descartada (PEREA-MORENO *et al*, 2018). Logo, a utilização da casca de amendoim para produção de biochar justifica-se devido à sua grande disponibilidade na forma de resíduo industrial.

Para avaliar o potencial do biochar para adsorver Cr (VI) foram realizados ensaios de adsorção em batelada e os dados foram ajustados à isoterma de adsorção, sendo possível determinar a capacidade máxima de adsorção do adsorvente. Essa capacidade foi, então, comparada a de outros adsorventes para a remoção de cromo hexavalente, disponível na literatura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

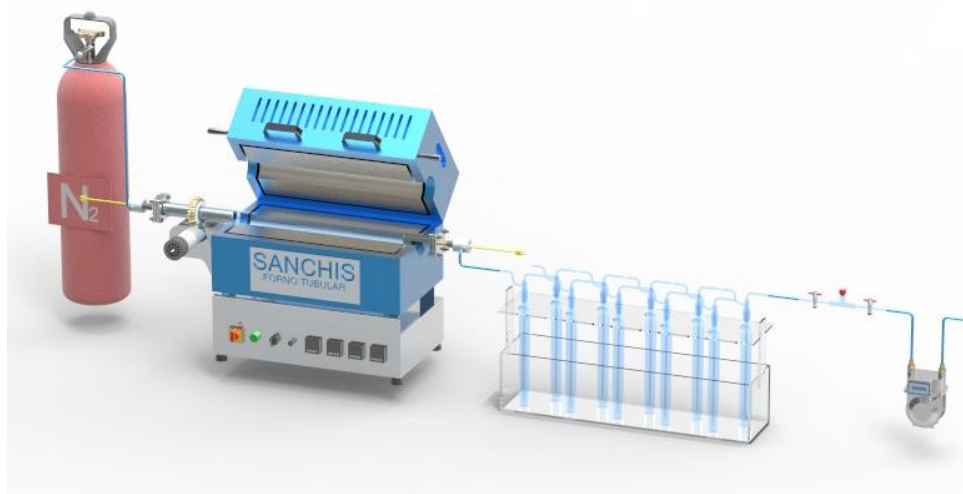
O biochar foi preparado a partir da casca de amendoim através do processo de pirólise. Esse processo consiste na decomposição termoquímica da matéria orgânica, convertendo biomassa em biochar na ausência de oxigênio, o que garante a destruição de patógenos,

redução do volume de resíduos, além de um ambiente livre de poluição (QAMBRANI *et al*, 2017).

A amostra foi pirolisada em um reator de bancada, consistindo em um um forno com um reator cilíndrico de quartzo acoplado, que opera em batelada (Figura 1). O cilindro de quartzo foi carregado com aproximadamente 27 g de casca de amendoim seca e o sistema foi operado utilizando nitrogênio como gás inerte, a uma vazão de 0.15 L.min⁻¹. A temperatura do sistema foi programada para uma taxa de 5 °C.min⁻¹ até a temperatura final de 800 °C, com isoterma de 30 minutos. O bio-óleo e biochar resultantes foram coletados e pesados de modo a determinar o rendimento do processo, a fração gasosa foi contabilizada por diferença.

Em seguida, o biochar foi moído, peneirado e armazenado para ser posteriormente utilizado nos ensaios de adsorção. Uma amostra foi utilizada para analisar a área de superfície através do método Bruanuer-Emmett-Teller (BET) de adsorção por nitrogênio à 77 K.

Figura 1 – Esquema de preparação do biochar



Fonte: autores.

2.2 EXPERIMENTOS DE ADSORÇÃO EM BATELADA

As soluções de Cr (VI) utilizadas nos ensaios foram preparadas a partir de uma solução mãe de 500 mg.L⁻¹ a qual, por sua vez, foi obtida a partir da solubilização de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇, padrão analítico) em água destilada.

Os experimentos foram realizados à temperatura ambiente (25 °C), sob agitação vigorosa constante. O pH das soluções foi ajustado até 2.5 utilizando-se quantidades de solução 0.1 M de H₂SO₄ (ácido sulfúrico) e solução 0.1 M de NaOH (hidróxido de sódio) até a obtenção do pH desejado. Esse valor de pH foi utilizado pois vários estudos evidenciam que a adsorção do cromo hexavalente é favorecida em pHs baixos (SHANG, 2016; DONG, 2015), além de ser o pH ideal para a complexação do Cr (VI) com a 1,5 difenilcarbazida.

Para os ensaios de equilíbrio, foram utilizadas soluções de 100 mL de 15, 25, 45, 60 e 75 ppm, adicionando-se 0.2 g de biochar. Os ensaios foram realizados em períodos de 240 minutos. Após a adição do biochar à solução, foram retiradas alíquotas de 5 mL, em tempos determinados, as quais eram filtradas de modo a separar o material sólido da parte líquida e posteriormente analisadas.

O cromo hexavalente foi quantificado indiretamente através da técnica analítica de colorimetria. Foi utilizada solução de 1,5-difenilcarbazida, a qual era responsável por complexar o Cr (VI) presente nas soluções preparadas a partir das alíquotas retiradas,

conferindo cor à esta. A cor conferida pode ser quantificada através de valores de absorvância medidos em um espectrofotômetro, com comprimento de onda ajustado a 540 nm. Os valores de absorvância foram convertidos para valores de concentração de Cr (VI) através de uma curva de calibração.

De modo a ilustrar e justificar o processamento do resíduo da casca de amendoim e sua transformação em biochar, realizou-se um ensaio adicional. Adicionou-se, em soluções distintas de 40 ppm de Cr (VI), aproximadamente 0.2 g de biochar e 0.2 g de casca *in natura* moída. Como o objetivo era mais ilustrativo, o tempo de contato foi menor que o dos demais ensaios, de 120 minutos.

2.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO E ANÁLISE DO EQUILÍBRIO

O percentual de remoção e a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e , mg.g⁻¹) foram determinados, para cada concentração inicial (C_0 , mg.L⁻¹) de cromo na fase líquida, através das equações (1) e (2), respectivamente.

$$Remoção(\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2)$$

Onde V (L) é o volume da solução, m é a massa de adsorvente (g) e C_t (mg.L⁻¹) é a concentração de Cr (VI) no tempo t e C_e (mg.L⁻¹) é a concentração no equilíbrio.

Os dados de q_e e C_e foram ajustados a dois modelos de isotermas de adsorção, o de Langmuir (LANGMUIR, 1918) e o de Freundlich (FREUNDLICH, 1906), representados pelas equações (3) e (4), respectivamente.

$$q_e = \frac{q_m k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (3)$$

$$q_e = k_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

Onde q_m (mg.g⁻¹) é a capacidade máxima de adsorção, k_L (L.mg⁻¹) é a constante de Langmuir, k_F (mg.g⁻¹)(mg.L⁻¹)^{-1/n} é a constante de Freundlich e $1/n$ é o fator de heterogeneidade. Os parâmetros foram determinados por regressão não linear dos dados de acordo com os modelos. Foram determinados também o coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio relativo (ARE) para avaliar a aderência dos ajustes (ZAZYCKI, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

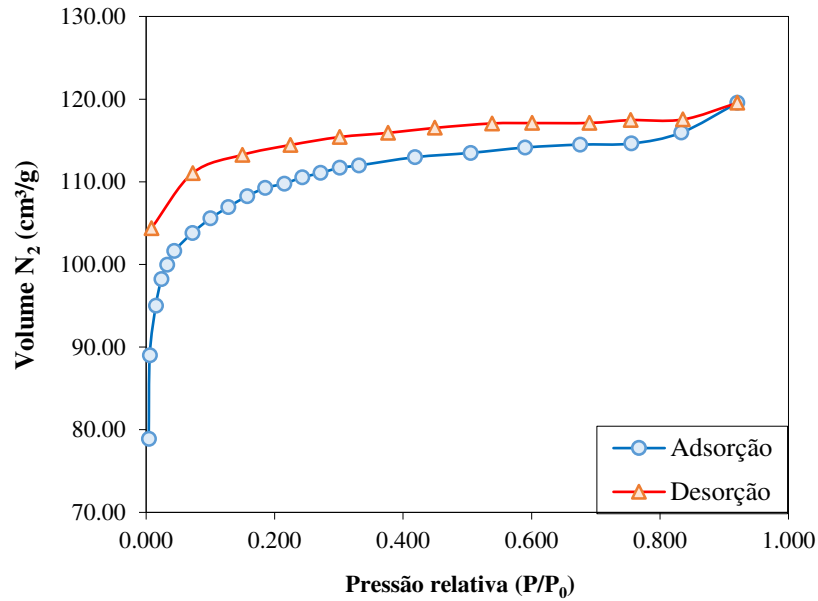
3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Para as 27 g de casca de amendoim alimentadas, foram produzidas 7.5 g de biochar, com um rendimento calculado aproximado de 27.7 %.

Da análise de área pelo método BET determinou-se a área de superfície como 326.5 m².g⁻¹. Além disso, através da isoterma de adsorção/dessorção de nitrogênio em função da pressão relativa (P/P_0) (Figura 2) avaliou-se o tipo de estrutura dos poros. De acordo com a IUPAC (2015), a estrutura dos poros do biochar pode ser classificada como micro-mesoporosa, que consiste em uma mistura entre micro e meso poros, a isoterma de

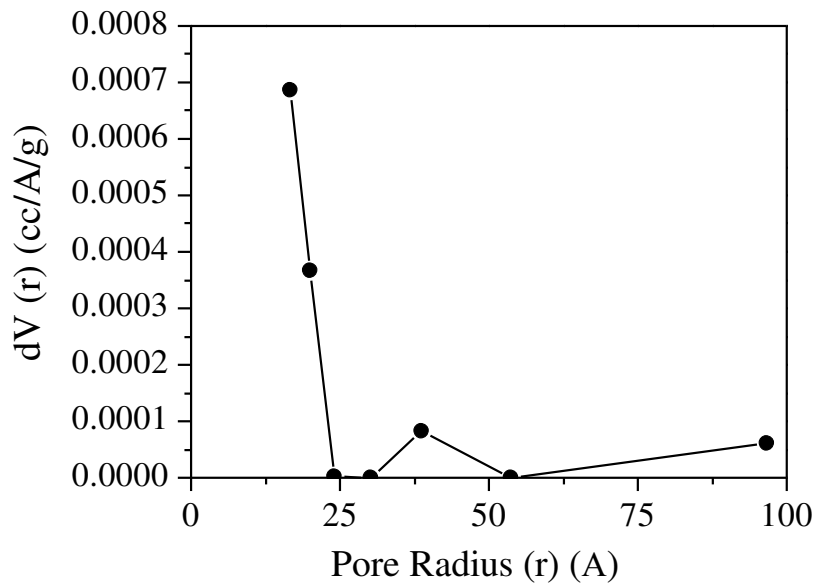
adsorção/dessorção se classifica como uma mistura da isoterma tipo I e II (a) com loop de histerese do tipo H4, característico de material do tipo micro-mesoporoso. Da análise foram determinados, também o volume total de poros, igual a $0.1849 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, e o tamanho médio de partícula, de aproximadamente 22.6 \AA . A Figura 3 amostra a distribuição de tamanho de poros no Biochar, corroborando com a classificação da IUPAC, onde a maior fração de poros está abaixo de 25 \AA .

Figura 2 – Isotherma de adsorção e dessorção de N_2 em função de P/P_0



Fonte: autores.

Figura 3 – Distribuição de tamanho de poros na dessorção

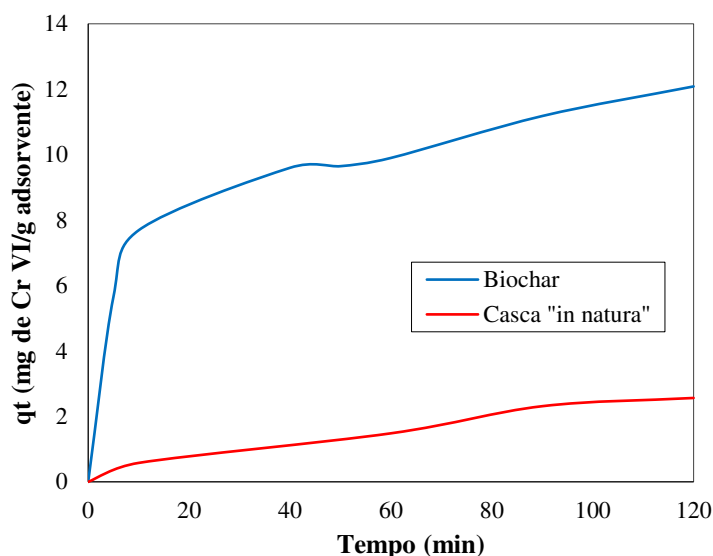


Fonte: autores.

3.2 COMPARATIVO ENTRE CASCA DE AMENDOIM E BIOCHAR COMO ADSORVENTE

A Figura 4 representa um comparativo entre o desempenho da casca de amendoim *in natura* e do biochar na adsorção de cromo hexavalente em uma solução de 40 ppm.

Figura 4 – Perfil de capacidade de adsorção da Casca de amendoim *versus* Biochar proveniente do amendoim em função do tempo



Fonte: autores.

Observa-se, claramente, que a capacidade de adsorção do biochar é muito superior à da casca não-pirolisada. Logo, destaca-se a importância do processo de transformação da biomassa em biochar que, apesar de representar um custo adicional de produção, reflete de modo significativo no desempenho do material na adsorção de cromo hexavalente, tornando este resíduo com potencial para ser utilizado como material adsorvente

3.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ADSORÇÃO

Para cada concentração inicial de solução, C_0 , e para cada tempo foram calculados os percentuais de remoção de cromo, reunidos em um gráfico e representados na Figura 5. Observa-se que as curvas para baixas concentrações iniciais de cromo, entre 15 e 45 ppm, apresentam comportamentos diferentes das curvas para altas concentrações, neste caso 60 e 75 ppm.

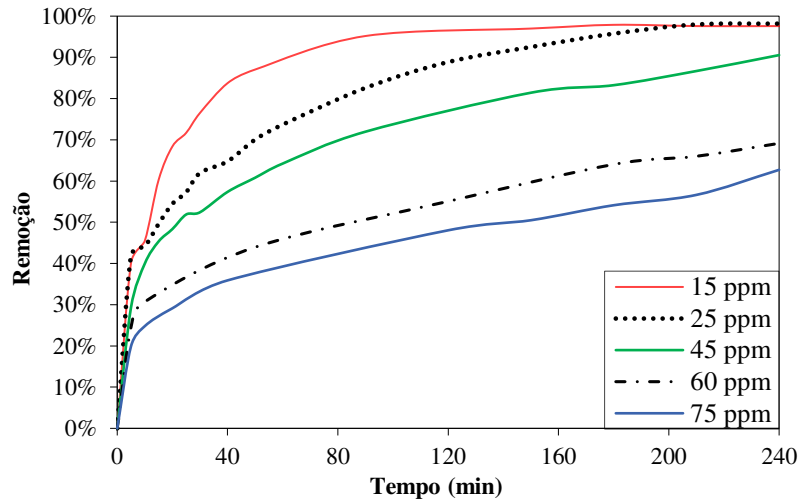
É possível perceber que, para concentrações iniciais mais baixas de cromo, o equilíbrio ou é atingido ou está próximo nos 240 minutos. Para concentrações mais elevadas o equilíbrio só pode ser observado após 24 horas. Isso significa que o tempo de contato necessário entre o biochar e a solução para que ocorra a adsorção do Cr (VI) relativamente elevado.

Com relação à capacidade de adsorção no equilíbrio, q_e , esta foi calculada após 24 horas, para cada concentração e representada graficamente na Figura 6.

Inicialmente se observa que a capacidade de adsorção aumenta com um aumento da concentração de cromo. Entretanto, uma redução na inclinação da curva indica que a

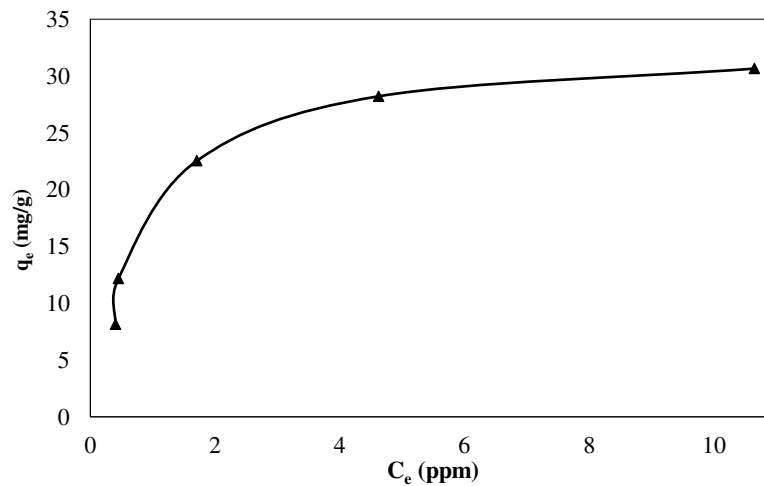
capacidade de adsorção no equilíbrio está se estabilizando, ou seja, a capacidade máxima de adsorção está sendo atingida indicando a saturação do adsorvente.

Figura 5 – Percentual de remoção em função do tempo e da concentração inicial de cromo.



Fonte: autores.

Figura 6 – Capacidade de adsorção no equilíbrio.



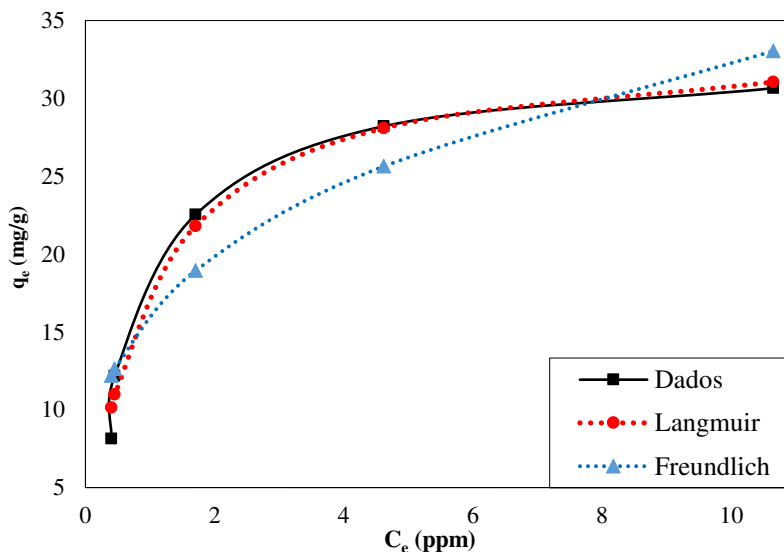
Fonte: autores.

3.3 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

As isotermas de adsorção foram obtidas unicamente para a temperatura, 25 °C ou 298 K. Se interessa estudar essa situação, pois ela representa uma condição operacional interessante, sem custos adicionais, na maioria das vezes, com aquecimento ou resfriamento.

A Figura 7 ilustra os dados e os ajustes destes aos modelos de Langmuir e Freundlich. A Tabela 1 representa os parâmetros calculados através das regressões, bem como os coeficientes de determinação e o ARE.

Figura 7 – Ajuste de modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich aos dados experimentais.



Fonte: autores.

Tabela 1 – Coeficientes e parâmetros estimados.

Modelo de isoterma	Valores para T = 298 K
Langmuir	
q_m (mg.g ⁻¹)	33.7921
k_L (L.mg ⁻¹)	1.0652
R^2	0.9843
ARE (%)	7.8599
Freundlich	
k_F (mg.g ⁻¹)(mg.L ⁻¹) ^{-1/n}	16.0893
1/n	0.3043
R^2	0.8919
ARE (%)	17.2858

Fonte: autores.

Como se observa, tanto no gráfico como na tabela, o modelo de Langmuir foi o que apresentou a maior aderência aos dados experimentais. O ajuste apresentou um coeficiente de determinação de 0.98 e erro médio associado de 7.8%, o que indica um bom ajuste. O modelo de Freundlich, como visualizado no gráfico, não é uma boa representação dos dados. Isso é reforçado por um baixo valor de R^2 (0.89) e elevado valor de ARE (17.3%). Existem diversos outros modelos de isotermas que podem ser utilizados, porém, aplicaram-se apenas os dois aqui apresentados devido ao comportamento da curva, que comprovadamente segue o modelo de Langmuir.

A partir do ajuste determinou-se a capacidade máxima de adsorção do adsorvente (q_m) de cerca de 33.79 mg de Cr (VI)/g de biochar. Com esse valor, é possível comparar o material aqui estudado com outros materiais presentes na literatura, com relação a remoção de cromo hexavalente. Essa comparação está representada na Tabela 2. Como se pode verificar, o

biochar proveniente da casca de amendoim apresenta uma capacidade de remoção elevada, se comparada a outros materiais, na adsorção de Cr (VI).

Tabela 2 – Comparativo da capacidade de adsorção de diferentes bioadsorventes para a remoção de Cr (VI)

Biochar	Capacidade de adsorção (mg/g)	Referência
<i>Spirogyra</i> Spp.	0.3	Gupta et al (2001)
Bagaço de cana	1.8	Alomá <i>et al</i> (2014)
Amido de batata modificado	4.8 – 24.4	Pillai <i>et al</i> (2013)
<i>Aspergillus niger</i>	6.97	Munir <i>et al</i> (2010)
Folhas de cacto	7.08	Dakiky <i>et al</i> (2002)
Casca de batata	8.01	Gebrehawaria <i>et al</i> (2015)
Folhas de nim	10.40	Gebrehawaria <i>et al</i> (2015)
Cascas de amêndoa	10.61	Dakiky <i>et al</i> (2002)
Casca de arroz	11.40	Singha e Das (2011)
Farelo de arroz	12.34	Singha e Das (2011)
Serragem	15.82	Dakiky <i>et al</i> (2002)
Quitosana enxertada com n-butilacrilato	17.14	Kumar <i>et al</i> (2014)
Casca de coco	18.70	Singha e Das (2011)
Casca de nim	19.60	Bhattacharya <i>et al</i> (2007)
Casca de broto de bambu	28.72	Hu <i>et al</i> (2019)
Casca de amendoim	33.79	Estudo atual

4 CONCLUSÃO

No presente estudo, foi produzido e avaliado biochar a partir da casca de amendoim como um adsorvente alternativo para a remoção de cromo hexavalente de águas residuais, com especial interesse em efluentes industriais. A remoção desse metal se faz necessária devido à sua toxicidade e ação cancerígena.

Com relação ao potencial adsorvente do material, este apresentou uma capacidade de adsorção de 33.79 mg.g⁻¹. Comparando esse valor com o de outros materiais avaliados para a remoção de cromo hexavalente de águas residuais, pode-se dizer que a utilização do material estudado se faz interessante. Além de bons resultados na adsorção de Cr (VI), a aplicação do biochar a partir da casca de amendoim se justifica pois pode ser produzido a partir de resíduos de diversas indústrias que utilizam o amendoim como matéria-prima. O aproveitamento de resíduos para produção do biochar, além de destinar um material que provavelmente seria descartado, está associado à custos mais baixos com relação à aplicação no tratamento de efluentes contaminados com Cr (VI), se comparado a outros métodos existentes, o que favorece sua utilização.

REFERÊNCIAS

- ALOMÁ, I. D. *et al.* Biosorption of Cr⁶⁺ from aqueous solution by sugarcane bagasse. **Desalin Water Treat**, v. 52, p. 5912-5922, 2014.
- BHATTACHARYA, A. K. *et al.* Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr (VI) from aqueous solutions using different low-cost adsorbents. **Chemical Engineering Journal**, v. 137, ed. 3, p. 529-541, 2008.
- DAKIKY, M. *et al.* Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents. **Advances in Environmental Research**, v. 6, ed. 4, p. 533-540, 2002.
- DENG, Y. J. *et al.* The Effect of Hexavalent Chromium on the Incidence and Mortality of Human Cancers: A Meta-Analysis Based on Published Epidemiological Cohort Studies. **Frontiers in Oncology**, v. 9, n. 24, 2019.
- DONG, X. *et al.* Characteristics and mechanisms of hexavalent chromium removal by biochar from sugar beet tailing. **Journal of Hazardous Materials**, v. 190, ed. 1-3, p. 909-915, 2015.
- FREUNDLICH, H.M.F. Over the adsorption in solution. **The Journal of Physical Chemistry**. v. 57, p 385-471, 1906.
- GEBREHAWARIA, G. *et al.* Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using barks of *Acacia albida* and leaves of *Euclea schimperi*. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, ed. 5, p. 1569-1580, 2015.
- GUPTA, V. K. *et al.* Biosorption of chromium (VI) from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species. **Water Research**, v. 35, p. 4079-4085, 2001.
- HU, H. *et al.* Removal of hexavalent chromium, an analogue of pertechnetate, from aqueous solution using bamboo (*Acidosasa edulis*) shoot shell. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 321, p. 427-437, 2019.
- IUPAC. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution: IUPAC Technical Report. **Pure Applied Chemistry**: DE GRUYTER, 2015.
- KHELAIPIA, F. Z. *et al.* Valorization of raw biomaterial waste-date stones-for Cr (VI) adsorption in aqueous solution: Thermodynamics, kinetics and regeneration studies. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 114, p. 76-86, 2016.
- KUMAR, A. *et al.* Microwave assisted preparation of n-butyl acrylate grafted chitosan and its application for Cr (VI) adsorption. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 66, p. 135-143, 2014.

LANGMUIR, L. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **J. American Chemical Society**, v. 40, p 1361-1403, 1918.

MUNIR, K. Isotherm studies for determination of removal capacity of bi-metal (Ni and Cr) ions by *Aspergillus niger*. **Pakistan Journal of Botany**, v. 42, ed. 1, p. 593-604, 2010.

MURUGAVELH, S. *et al.* Bioreduction of hexavalent chromium by free cells and cell free extracts of *Halomonas sp.* **Chemical Engineering Journal**, v. 203, p. 415-422, 2012.

NGUYEN, L.H. *et al.* Treatment of Hexavalent Chromium Contaminated Wastewater Using Activated Carbon Derived from Coconut Shell Loaded by Silver Nanoparticles: Batch Experiment. **Water Air and Soil Pollution**, v. 230, n. 68, ed. 3, 2019.

PEREA-MORENO, M. A. *et al.* Peanut Shell for Energy: Properties and Its Potential to Respect the Environment. **Sustainability**, v. 10, n. 3254, ed. 9, 2018.

PILLAI, S. S. *et al.* Biosorption of Cr (VI) from aqueous solution by chemically modified potato starch: equilibrium and kinetic studies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 92, p. 199-205, 2013.

PRADHAN, D. *et al.* Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 55, p. 1-20, 2017.

QAMBRANI, N. A. *et al.* Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 255-273, 2017.

SHANG, J. G. *et al.* Chromium removal using magnetic biochar derived from herb-residue. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 68, p. 289-294, 2016.

SINGHA, B.; DAS, S. K. Biosorption of Cr (VI) ions from aqueous solutions: Kinetics, equilibrium, thermodynamics and desorption studies. **Colloids and Surfaces B-Biointerfaces**, v. 84, ed. 1, p. 221-232, 2011.

ZAZYCKI, M. A. *et al.* New biochar from pecan nutshells as an alternative adsorbent for removing reactive red 141 from aqueous solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 57-65, 2018.