

Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo*

Estimation of residual lignocellulosic materials as adsorbents of chromium and lead

PARRA-REYES, JAIME-ANDRÉS¹; PÉREZ, EDIER-HUMBERTO²

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 18 de agosto 2020

Aprobado para publicación: 23 de mayo 2022

* Proyecto de investigación de origen: "Adsorción de cromo y plomo en materiales lignocelulósicos". Financiación: Grupo de Investigación en Agroquímica, Universidad del Cauca. Culminación: enero de 2019.

1 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Departamento de Química, Grupo de Investigación en Agroquímica. Químico. Popayán, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-9509-668X>

2 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Departamento de Química, Grupo de Investigación en Agroquímica. Ph.D. Ciencias Químicas. Popayán, Colombia. <http://orcid.org/0000-0002-4169-0082>

Correspondencia: jparrar@unicauca.edu.co

Cómo citar este artículo:

PARRA-REYES, JAIME-ANDRÉS; PÉREZ, EDIER-HUMBERTO. Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 21, n. 1, 2023, p.18-27. Doi: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>

RESUMEN

Los materiales lignocelulósicos residuales pueden usarse como adsorbentes de metales pesados presentes en el agua, propiciando la adsorción de iones metálicos sobre la superficie y sitios activos de los biomateriales, resultando en una remoción eficiente y de bajo costo. En este caso, se hace innovación con el aprovechamiento de residuos agroindustriales del fique (*Furcraea macrophylla*) y del capacho de maíz (*Zea mays*) como fases adsorbentes de los metales cromo y plomo, con el fin de valorar su capacidad como adsorbente de estos metales presentes en muestras de agua, determinado el tiempo de equilibrio, tipo de isoterma y capacidad máxima de adsorción; encontrando que en un tiempo de 12 horas, la fibra de fique tiene una capacidad de adsorción de Cr y Pb de $7,81 \pm 1,40$ mg/g y $169,51 \pm 1,37$ mg/g respectivamente, observando, una forma de isoterma de adsorción tipo Freundlich; mientras que la fibra de capacho de maíz presenta una capacidad de adsorción de $13,35 \pm 3,28$ mg/g para cromo y $15,01 \pm 3,47$ mg/g para plomo, mostrando un comportamiento en su isoterma de adsorción tipo Langmuir, concluyendo que ambas fibras tienen potencial para la remoción de los metales estudiados, especialmente la fibra de fique.

PALABRAS CLAVE:

Adsorción; Metales; Fique; Maíz; Materiales lignocelulósicos; Freundlich; Langmuir; Remoción; Contaminación; Biomateriales.

ABSTRACT

Residual lignocellulosic materials can be used as adsorbents for heavy metals present in water, promoting the adsorption of metal ions on the surface and active sites of biomaterials, resulting in a low-cost and efficient removal. In this case, the residues from the agroindustrial use of the fique (*Furcraea macrophylla*) and the agricultural process of the corn maize (*Zea mays*) were studied as adsorbing phases of chromium and lead metals, in order to assess their capacity as biosorbents of these metals present in water samples, determined by equilibrium time, type of isotherm and maximum adsorption capacity; finding that in a time of 12 hours, the fique fiber has an adsorption capacity of Cr and Pb of $7,81 \pm 1,40$ mg/g and $169,51 \pm 1,37$ mg/g respectively, observing, a form of Freundlich type adsorption isotherm; while the corn layer fiber has an adsorption capacity of $13,35 \pm 3,28$ mg/g for chromium and $15,01 \pm 3,47$ mg/g for lead, showing a behavior in its Langmuir-type adsorption isotherm, concluding that both fibers have potential for the removal of the metals studied, especially the fiber of fique.

KEYWORDS.

Adsorption; Metals; Fique; Maize; Lignocellulosic materials; Freundlich; Langmuir; Remotion; Contamination; Biomaterials.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria combina la producción agrícola y los procesos industriales con el fin desarrollar productos alimenticios o materias primas destinadas al mercado para su consumo. Estos procesos deben ser sensibles a las problemáticas ambientales, siempre procurando el desarrollo de la conciencia social de manera sostenible, considerando que los subproductos agroindustriales generados en todas las etapas de producción, constituyen un problema de generación de residuos, el cual sigue en aumento y generan mayor contaminación al ambiente si no son apro-

vechados en otros procesos o son transformados en otros productos de más fácil degradación en el medio (González *et al.*, 2017; Lansa *et al.*, 2018).

Los residuos agroindustriales varían ampliamente en su composición, aunque la mayoría son de naturaleza almidonada o celulósica y muy pocos son ricos en nitrógeno. Los desechos agroindustriales celulósicos son de gran interés para su aprovechamiento en diferentes procesos, principalmente por el contenido aproximado de 40-60 % en celulosa, 30-40 % en hemicelulosas y 10-25 % en lignina, las cuales pueden variar dependiendo del tipo del material. Aunque la biomasa celulósica se utiliza generalmente como alimento para animales y fuente de energía mediante combustión directa, la cantidad excedente disponible se puede usar como materia prima para la bioconversión en productos de valor agregado y en diferentes procesos para la descontaminación de metales pesados en fuentes hídricas (Mo *et al.*, 2018).

Algunos de los tratamientos comunes para descontaminar efluentes que tienen presencia de metales pesados, son la precipitación química, el intercambio iónico, la tecnología de membranas, procesos electroquímicos y las extracciones orgánicas, entre otros; todos ellos tienen menor o mayor efectividad en la remoción, los cuales aunado a los costos del tratamiento los hace más o menos viable (Thakur *et al.*, 2020). Aprovechando la capacidad de captación pasiva de iones metálicos, los procesos de adsorción con residuos vegetales han llamado la atención por las propiedades que tienen estos materiales para retener, enlazar y acumular este y otros tipos de contaminantes por diferentes mecanismos asociados a sus componentes poliméricos principales, lignina y celulosa (Blázquez *et al.*, 2011; Neris *et al.*, 2019).

Los residuos de biomasa vegetal se destacan como un bioacumulador de especies metálicas mediante distintos mecanismos de adsorción y acumulación al interior de las células vivas y también como un biosorbente en la superficie de la célula con la biomasa sin vida (Rocha de Freitas *et al.*, 2019). El fenómeno de captación puede ocurrir por intercambio iónico, precipitación, complejación o atracción electrostática (Bankar and Nagaraja, 2018); ambos procesos son considerados biosostenibles pues son eficientes para la remoción de metales pesados y además son de bajo costo de implementación, sin embargo, los procesos de bioacumulación alcanzan un equilibrio de adsorción a bajas concentraciones y los procesos de funcionamiento de las plantas pueden verse afectados por el tipo de metal, su toxicidad y concentración, los cuales finalmente llevan a la interrupción del proceso de adsorción por la muerte de los organismos por la incorporación del metal en el interior de las células (Kanamarlapudi *et al.*, 2018); por otro lado, los procesos de biosorción, al emplear biomasa vegetal sin vida, permiten que el proceso sea más eficiente y que no se vea afectada por la toxicidad de los metales, alcanzando equilibrios a concentraciones mucho mayores y facilitando además los procesos de desorción, recuperación y reutilización de la biomasa (Shamim, 2018). En el presente reporte se evaluó la capacidad de los residuos lignocelulósicos de fique y maíz frente la retención de los metales pesados Cr y Pb.

MÉTODO

Los residuos vegetales de aserrín de Fique y capacho de Maíz se obtuvieron de diversos puntos geográficos de la meseta del municipio de Popayán (Colombia) y fueron trasladados al laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca (2°26'46,2" N 76°35'57,2" O, temperatura promedio de 24 °C, altitud de 1785 msnm y humedad relativa entre 73 y 80 %) donde fueron adecuados para desarrollar los procesos de biosorción, secando los materiales a temperatura ambiente, molerlos en un molino eléctrico Retsch y tamizarlos con un tamiz número 40, obteniendo un tamaño de partícula de 425 µm para cada una de las fibras vegetales. Este protocolo fue adaptado según las condiciones del laboratorio, con base en lo consignado por Crini and Lichtfouse (2018).

A las muestras procesadas se les determinó el tiempo de equilibrio de adsorción para los metales Cr y Pb, con base en modificaciones de metodologías previamente estudiadas (Seolatto *et al.*, 2014) y la metodología 3111a del "Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater" (APHA, 2018). A matraces de

50 mL que contenían 25 mL de Cr (III) y Pb (II) a una concentración inicial de 50 mg/L, pH de 4,5, y 25 °C de temperatura, se adicionó 1,0 g de cada material lignocelulósico sometiendo la mezcla a 170 rpm en un agitador horizontal, en tiempos que variaron entre 2 y 30 horas, con el fin de determinar el menor tiempo en el cual se alcanza la mayor adsorción de cada uno de los metales (equilibrio). Después de alcanzar el tiempo de equilibrio, las muestras se filtraron y la concentración de los metales en la solución restante se analizó mediante un equipo de espectrofotometría de absorción atómica marca con ionización por llama (EAA-IL, Thermo® serie S4SN71203).

Se determinó la máxima capacidad de adsorción de Cr y Pb en las muestras de material vegetal, tomando como referencia las metodologías estudiadas por Vishan *et al.* (2019) y el "Standard Methods" (APHA, 2018), donde 1,0 g de cada fibra vegetal se puso en contacto con 25 mL de cada metal en concentraciones de 20, 40, 50, 70 y 100 mg/L de cromo y plomo a 170 rpm por el tiempo de equilibrio predeterminado, posteriormente, las muestras fueron filtradas y se cuantificó la concentración remanente de los metales en la solución por EAA-IL. La cantidad estimada de cada metal adsorbido se estableció por la diferencia entre la concentración de metal suministrado y la concentración del metal que permanece en la solución una vez alcanzado el equilibrio, con los datos obtenidos se realizó un gráfico de la concentración adsorbida versus la concentración en equilibrio en la solución, para valorar la forma de la isoterma de biosorción y comparar con las gráficas de adsorción propuestas por Sing *et al.*, (1985) y comparar su forma para determinar el tipo de curva y deducir por semejanza el comportamiento del proceso de biosorción y de esta manera linealizarlas mediante el uso de las ecuaciones de isothermas de Langmuir (Ecuación 1) y Freundlich (Ecuación 2) (Beni and Esmaili, 2020), donde C_{Ad} representa la concentración adsorbida y C_e la concentración en equilibrio en ambas ecuaciones, con las cuales se calculó la capacidad máxima de adsorción en mg/g (q_m y K_F) y la fuerza de retención (b y n) en L/mg.

$$C_{Ad} = \frac{bq_m C_e}{1+bC_e} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$C_{Ad} = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Finalmente, para determinar el porcentaje de desorción de los metales biosorbidos en las muestras vegetales, cada muestra después del proceso de adsorción se secó a 60 °C por 24 h, posteriormente se adicionaron soluciones de ácido cítrico entre 0,1 y 0,5 M, se agitaron durante el tiempo de equilibrio para la biosorción, con posterior filtración y cuantificación (Srivastava and Goyal, 2010). Todos los análisis anteriormente descritos se desarrollaron por triplicado y se realizó la estadística correspondiente utilizando el software estadístico SPSS 23 empleando las pruebas de Shapiro-Wilks, Duncan y Tukey.

RESULTADOS

Se estableció en 12 horas el tiempo mínimo necesario para el proceso de adsorción y desorción de los metales cromo y plomo en los materiales residuales lignocelulósicos de fique y maíz (Figura 1), garantizando el tiempo de contacto necesario entre el adsorbato y adsorbente para que produzca la máxima adsorción.

Los resultados de los procesos de adsorción de las dos fibras vegetales se determinaron en un rango de concentración de $19,53 \pm 0,20$ y $91,95 \pm 0,13$ mg/L para Cr y de $20,38 \pm 0,13$ y $110,21 \pm 0,35$ mg/L para Pb. En el cuadro 1 se observa que, para ambos metales, a bajas concentraciones se presenta la mayor capacidad de adsorción en la fibra de capacho de maíz; por otro lado, se evidencia que el residuo lignocelulósico del fique presenta los mejores porcentajes de adsorción (con un valor mínimo de 88 % para Cr y de 99 % para Pb) en el rango de concentraciones evaluado.

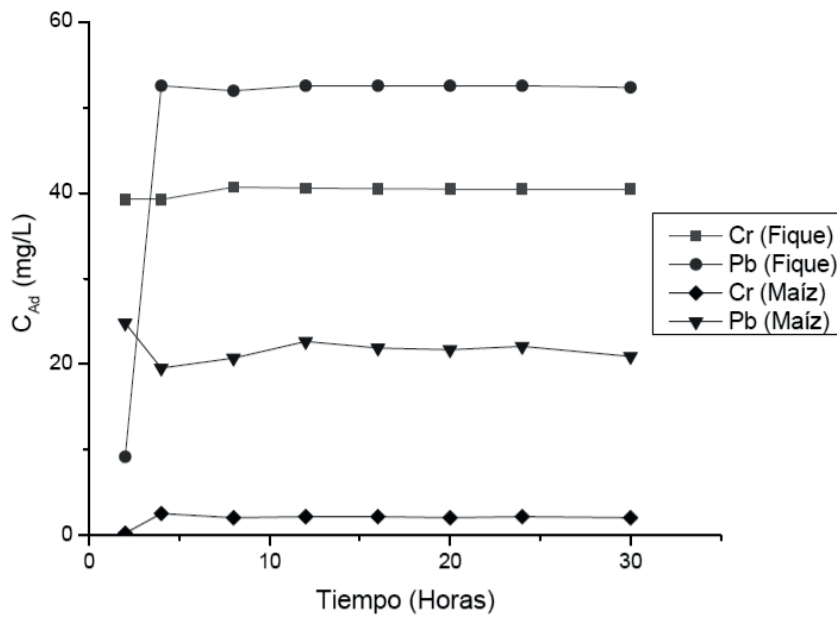


Figura 1. Tiempos de equilibrio de adsorción de Cr y Pb en material residual lignocelulósico de fave y maíz.

Cuadro 1. Resultados de la adsorción de plomo y cromo en las muestras de residuo vegetal.

Muestra	Metal	C_A (mg/L) ^a	C_e (µg/mL) ^b	C_{Ad} (µg/g) ^c	Adsorción %
Capacho de Maíz	Cromo	19,53 ± 0,20	9,65 ± 0,46	9,88 ± 0,46	50,60 ± 2,37
		38,85 ± 0,23	16,32 ± 0,44	22,53 ± 0,44	58,00 ± 1,13
		47,68 ± 0,13	34,81 ± 0,59	12,87 ± 0,59	26,99 ± 1,25
		65,47 ± 0,13	49,61 ± 0,53	15,85 ± 0,53	24,22 ± 0,81
		91,95 ± 0,13	78,80 ± 0,14	13,15 ± 0,14	14,30 ± 0,15
	Plomo	20,38 ± 0,13	3,35 ± 0,22	17,04 ± 0,22	83,59 ± 1,08
		41,33 ± 0,23	20,69 ± 0,42	20,64 ± 0,42	49,93 ± 1,03
		58,91 ± 0,13	39,65 ± 0,58	19,27 ± 0,58	32,70 ± 0,98
		81,77 ± 0,58	61,74 ± 0,23	20,03 ± 0,23	24,49 ± 0,28
		110,21 ± 0,35	95,84 ± 0,35	14,37 ± 0,35	13,04 ± 0,32
Aserrín de Fique	Cromo	19,53 ± 0,20	2,33 ± 0,01	17,20 ± 0,01	88,07 ± 0,07
		38,85 ± 0,23	3,74 ± 0,05	35,11 ± 0,04	90,37 ± 0,12
		47,68 ± 0,13	3,88 ± 0,03	43,80 ± 0,03	91,87 ± 0,06
		65,47 ± 0,13	4,73 ± 0,13	60,74 ± 0,13	92,77 ± 0,20
		91,95 ± 0,13	8,46 ± 0,20	83,49 ± 0,20	90,80 ± 0,22
	Plomo	20,38 ± 0,13	0,03 ± 0,01	20,35 ± 0,01	99,82 ± 0,06
		41,33 ± 0,23	0,04 ± 0,01	41,29 ± 0,01	99,90 ± 0,03
		58,91 ± 0,13	0,11 ± 0,07	58,80 ± 0,07	99,81 ± 0,12
		81,77 ± 0,58	0,17 ± 0,07	81,60 ± 0,07	99,79 ± 0,09
		110,21 ± 0,35	0,59 ± 0,01	109,62 ± 0,01	99,46 ± 0,01

^a C_A : Concentración Adicionada

^b C_e : Concentración en Equilibrio

^c C_{Ad} : Concentración Adsorbida

^d Porcentaje de Adsorción

Una vez elaboradas las isothermas de biosorción (Figura 2), se observa que los metales a bajas concentraciones presentan una rápida adsorción en las muestras de capacho de maíz, lo que permite considerar que este proceso de adsorción se puede describir mediante una isoterma es Tipo I o tipo Langmuir, la cual se caracteriza por tener una adsorción en Monocapa, donde la superficie del material se comporta de manera homogénea, los sitios de adsorción presenta la misma energía y donde los iones adsorbidos no tienen interacción entre ellos, en la cual generalmente se considera se originan interacciones químicas (Ramírez *et al.*, 2020), mientras que la interacción de los metales estudiados con el material lignocelulósico de fique muestra que la forma de la isoterma es de tendencia exponencial en el rango estudiado, lo que corresponde a una isoterma Tipo II o de tipo Freundlich, en la cual se considera que la superficie del material es heterogénea, con diferente energía en los diferentes sitios activos, lo que sugiere una adsorción en multicapa, donde además de la adsorción química inicial, los sitios activos pueden generar diferentes interacciones físicas como interacciones dipolo-dipolo, fuerzas de Van der Waals, entre otras (Farnane *et al.*, 2018).

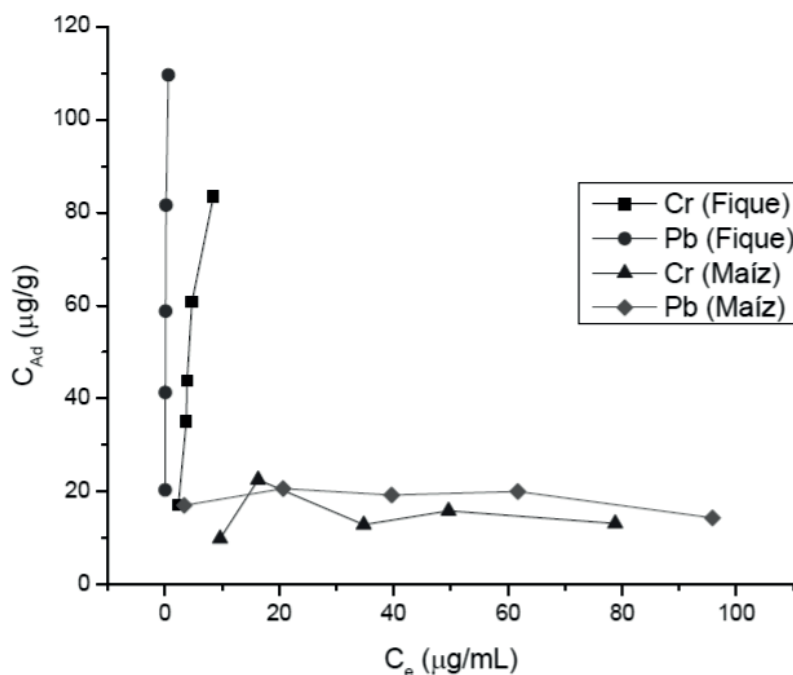


Figura 2. Isothermas de adsorción de Cr y Pb en los residuos lignocelulósicos de fique y maíz.

Linealizadas las curvas de adsorción (Figuras 3 y 4) y aplicando el método de mínimos cuadrados para la cuantificación, se determinó la capacidad máxima de adsorción y la fuerza de retención de Cr y Pb cada una de las muestras de material vegetal (Cuadro 2), donde se observa que la fibra de fique presenta los mejores valores de capacidad de adsorción para plomo y la fibra de maíz para cromo, teniendo en cuenta además que los valores de la fuerza de retención de la fibra de maíz son menores que los presentados por la fibra de fique para los metales estudiados.

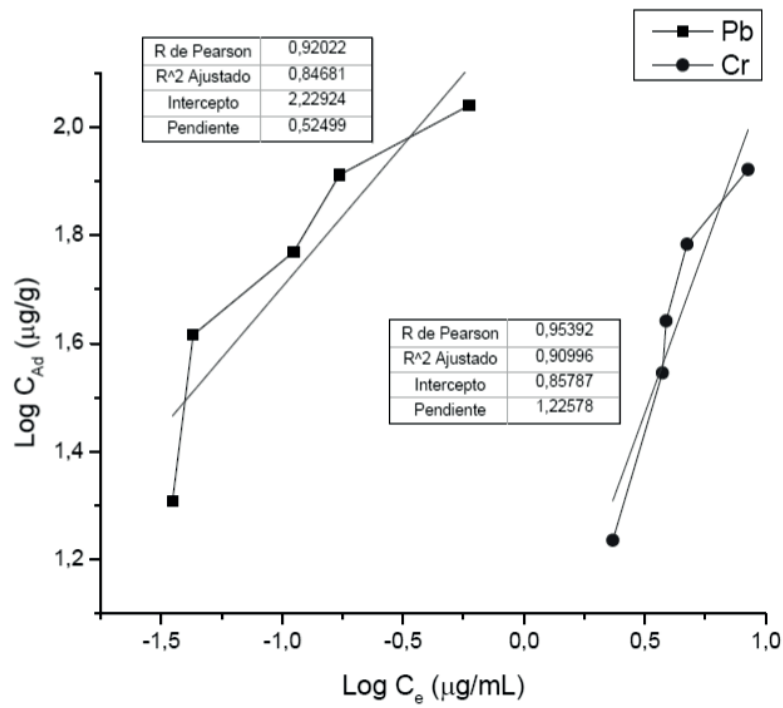


Figura 3. Linealización de las isothermas de adsorción de Cr y Pb en el material residual de figue.

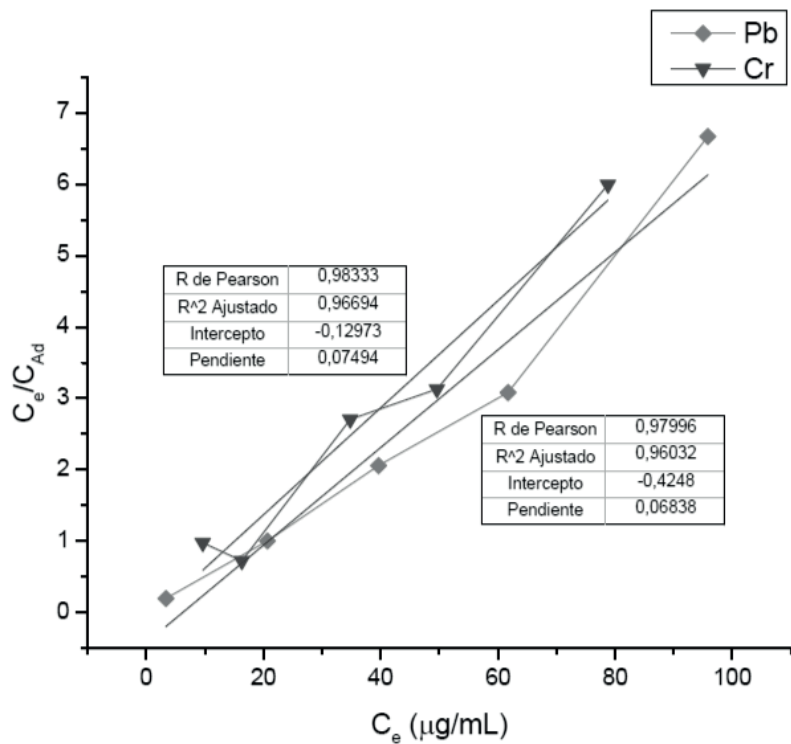


Figura 4. Linealización de las isothermas de adsorción de Cr y Pb en el material residual de maíz.

Cuadro 2. Resultados de la adsorción de Pb y Cr en las muestras vegetales.

Fibra	Cromo		Plomo	
	Fuerza retención	Capacidad de Adsorción (mg/g Adsorbente)	Fuerza retención	Capacidad de Adsorción (mg/g Adsorbente)
Capacho de Maíz	0,58 ± 0,02	13,35 ± 3,28	0,16 ± 0,02	15,01 ± 3,47
Aserrín de Fique	1,23 ± 0,22	7,81 ± 1,40	0,52 ± 0,13	169,51 ± 1,37

Gran parte de la capacidad de adsorción de las fibras vegetales se debe al contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, esta última considerada la de mayor importancia (Farnane *et al.*, 2018) por su variedad de grupos funcionales que dependen de la naturaleza del material y de los grupos derivados de los alcoholes coumarílico, coniferílico y sinapílico que están presentes en la molécula (Chávez and Domine, 2018).

Los ensayos de desorción de los metales a diferente concentración de ácido cítrico permitieron determinar que a medida que el pH de la solución es más ácido se produce una mayor extracción del metal, debido a que las cargas metálicas adsorbidas logran solubilizarse con mayor facilidad y así mismo realizar un intercambio catiónico con las cargas H⁺, producto de la disociación del ácido utilizado, lo que genera una digestión muy suave del material permitiendo que la estructura vegetal no sufra variaciones o alteraciones en su superficie y que permita reutilizar la fibra para posteriores procesos de adsorción.

La máxima capacidad de desorción (C_{De}) de los metales Cr y Pb adsorbidos en las muestras vegetales se logró con una solución 0,5M (pH 1,49) de ácido cítrico (Figura 5), observando que en la fibra de fique hay menor desorción de Pb que Cr, mientras que en la fibra de maíz se observa un comportamiento similar de desorción para ambos metales, evidenciando que la fibra de fique presenta mejor retención de los metales al compararlo con la fibra de maíz, especialmente para Pb.

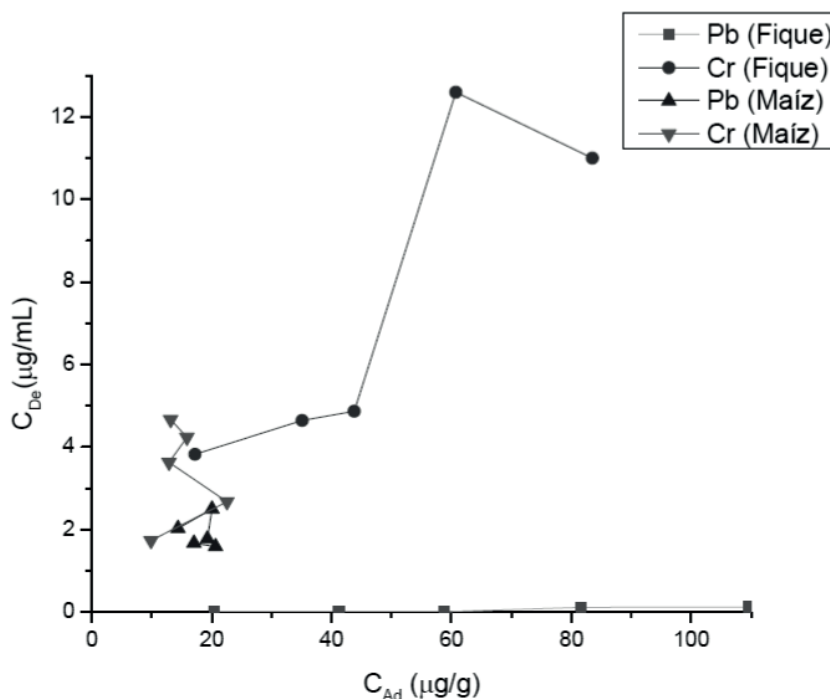


Figura 5. Desorción de Cr y Pb en las muestras vegetales utilizando Ácido Cítrico 0,5 M.

CONCLUSIONES

Los datos experimentales obtenidos en este estudio muestran que el aserrín de fique tiene un alto potencial para ser utilizado en la adsorción de los metales pesados Cr y Pb, lo cual puede ser una evidencia relevante en aspectos ambientales para el tratamiento de aguas residuales industriales, destacándose la alta capacidad de adsorción de $169,51 \pm 1,37$ mg de Pb/g de aserrín de fique. El capacho de maíz también se muestra como una alternativa para la remediación de aguas superficiales contaminadas con estos metales si estos están presentes en bajas concentraciones. Así mismo tenemos que los resultados del proceso de desorción son bajos en ambos materiales, especialmente para la fibra de fique, lo cual es ideal para evitar que estos metales vuelvan a liberarse al ambiente. Pese a los buenos resultados alcanzados se deben desarrollar más estudios con varios metales para determinar la selectividad de estos materiales a diferentes metales pesados. Los datos encontrados indican que la fibra de fique muestra un proceso de adsorción frente a Cr y Pb que puede ser descrita por el modelo de Freundlich o adsorción multicapa, mientras que la fibra de maíz sugiere un modelo de adsorción de Monocapa o de Langmuir.

REFERENCIAS

- BANKAR, ASHOK; NAGARAJA, GEETHA. Recent Trends in biosorption of heavy metals by Actinobacteria. En: PRATAP-SINGH, BHIM; KUMAR-GUPTA, VIJAI; KUMAR-PASSARI, AJIT; New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering. 1 ed. Oxford (Reino Unido): Elsevier B.V., 2018, p. 257-276. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63994-3.00018-7>
- BENI, AGHABABAI-ALI; ESMAEILI, AKBAR. Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A Review. *Environmental Technology & Innovation*, v. 17, 2020, p. 100503. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100503>
- BLÁZQUEZ, GABRIEL; MARTÍN-LARA, MARÍA-ÁNGELES; DIONISIO-RUIZ, ELENA; TENORIO, GERMÁN; CALERO, MÓNICA. Evaluation and comparison of the biosorption process of copper ions onto olive stone and pine bark. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 17, n. 5-6, 2011, p. 824-833. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.08.003>
- CHÁVEZ-SIFONTES, MARVIN; DOMINE, MARCELO-EDUARDO. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, v. 4 n. 4, 2018, p. 15-46.
- CRINI, GRÉGORIO; LICHTFOUSE, ERIC. Adsorbents for pollutant removal: fundamentals and design. 1 ed. Cham (Suiza): Springer Nature Switzerland, 2018, p. 35-86. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92111-2>
- FARNANE, M.; MACHROUHI, AICHA; ELHALIL, ALAËDDINE; ABDENNOURI, M.; QOURZAL, S.; TOUNSADI, HANANE; BARKA, NOUREDDINE. New sustainable biosorbent based on recycled deoiled carob seeds: optimization of heavy metals remediation. *Journal of Chemistry*, v. 4, 2018, p. 1-16. <https://doi.org/10.1155/2018/5748493>
- GONZÁLEZ-PEÑARANDA, LAURA-VICTORIA; MONTENEGRO-GÓMEZ, SANDRA-PATRICIA; GIRALDO-ABAD, PAULA-ANDREA. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, v. 8 n. 2, 2017, p. 141-150.
- KANAMARLAPUDI, SRI-LAKSHMI-RAMYA-KRISHNA; CHINTALPUDI, VINAY-KUMAR; MUDDADA, SUDHAMANI. Application of biosorption for removal of heavy metals from wastewater. En: DERCO, JAN; VRANA, BRANISLAV. Biosorption. 1 ed. Bratislava (República Eslovaca): IntechOpen, 2018, p. 69-116. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77315>
- LANSA-FURLAN, FERNANDA; CONSOLIN-FILHO, NELSON; BARRIQUELLO-CONSOLIN, MARCILENE-FERRARI; SUZSEK-GONÇALVES, MORGANA; VALDERRAMA, PATRICIA; KAMAL-GENENA, AZIZA. Use

- of agricultural and agroindustrial residues as alternative adsorbents of manganese and iron in aqueous solution. *Ambiente & Água*, v. 13 n. 2, 2018, p. 1–12.
<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2181>
- MO, JIAHO; YANG, QI; ZHANG, NA; ZHANG, WENXIANG; ZHENG, YI; ZHANG, ZHIEN. A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, v. 227, 2018, p. 395–405.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.069>
- NERIS, JORDAN-BRIZI; MARTINEZ-LUZARDO, FRANCISCO-HERIBERTO; PARANAHOS-DA SILVA, ERIK-GALVÃO; GARCIA-VELASCO, FERMIN. Evaluation of adsorption processes of metal ions in multi-element aqueous systems by lignocellulosic adsorbents applying different isotherms: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, v. 357, 2019, p. 404–420.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.125>
- RAMÍREZ-CALDERÓN, OLGA A.; ABDELDAYEM, OMAR M.; PUGAZHENDHI, ARIVALAGAN; RENE, ELDON R. Current updates and perspectives of biosorption technology: an alternative for the removal of heavy metals from wastewater. *Current Pollution Reports*, v. 6, 2020, p. 8–27.
<https://doi.org/10.1007/s40726-020-00135-7>
- ROCHA_DE FREITAS, GEOVANI; DA SILVA, MEURIS-GURGEL-CARLOS; ADEODATO-VIEIRA, MELISSA-GURGEL. Biosorption technology for removal of toxic metals: a review of commercial biosorbents and patents. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, 2019, p. 19097–19118.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05330-8>
- SEOLATTO, ARACELI A.; MARTINS, TIAGO-DIAS; BERGAMASCO, ROSÂNGELA; TAVARES, CÉLIA-REGINA-GRANHEN; COSSICH, ENEIDA S.; DA SILVA, EDSON-ANTONIO. Biosorption study of Ni²⁺ and Cr³⁺ by *Sargassum filipendula*: kinetics and equilibrium. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 31, n. 1, 2014, p. 211–227.
<https://doi.org/10.1590/S0104-66322014000100020>
- SHAMIM, SABA. Biosorption of Heavy Metals. En: DERCO, JAN; VRANA; BRANISLAV. *Biosorption*. 1 ed. Bratislava (República Eslovaca): IntechOpen, 2018, p. 21–49.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.72099>
- SING, KENNETH S.W.; EVERETT, DOUGLAS H.; HAUL, R.A.W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, ROBERT A.; ROUQUÉROL, JEAN; SIEMIENIEWSKA, TERESA. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry*, v. 57 n. 4, 1985, p. 603–619.
<https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- SRIVASTAVA, SHALINI; GOYAL, PRITEE. Novel biomaterials decontamination of toxic metals from wastewater. 1 ed. Berlin (Alemania): Springer-Verlag, 2010, p. 146.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-11329-1>
- THAKUR, VAISHALI; SHARMA, EKTA; GULERIA, ASHISH; SANGAR, SUGANDHA; SINGH, KULVINDER. Modification and management of lignocellulosic waste as an ecofriendly biosorbent for the application of heavy metal ions sorption. *Materials Today: Proceedings*, v. 2, n. 4, 2020, p. 608–619.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.756>
- UNITED STATES OF AMERICA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). APHA method 3111: metals by flame atomic absorption spectrometry. Washington D.C. (United States Of America): APHA Press, 2018, 9 p.
- VISHAN, ISHA; SAHA, BISWANATH; SIVAPRAKASAM, SENTHILKUMAR; KALAMDHAD, AJAY. Evaluation of Cd (II) biosorption in aqueous solution by using lyophilized biomass of novel bacterial strain *Bacillus badius* AK: Biosorption kinetics, thermodynamics and mechanism. *Environmental Technology and Innovation*, n. 14, 2019, p. 100323.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100323>