

Evaluación de la remoción de metales pesados en aguas contaminadas con quitosano obtenido a partir de desechos de exoesqueleto de camarón blanco (*Litopenaeus setiferus*)

Evaluation of the removal of heavy metals in contaminated waters with chitosan obtained from white shrimp (*Litopenaeus setiferus*) exoskeleton waste.

Zúñiga Soto David Uriel¹, Espinoza Rodríguez David Antonio², Núñez Vázquez Arely de Jesús², Rivera Duarte Montserrat², Collazo Alfaro Guadalupe², Parra González José Silvestre², Bernal Cantero Alonso Ismael³, Serafín Muñoz Alma Hortensia^{4*}, Gutiérrez Ortega Norma Leticia⁵, López Alvarado Hugo⁶.

¹Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

²Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. ³Maestría en Ciencias del Agua, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. ^{4,5}Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. ⁶Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

*sermuah@ugto.mx *normagut@ugto.mx

Resumen

En la actualidad la contaminación del agua por metales pesados representa una de las problemáticas ambientales más críticas a nivel mundial debido a su toxicidad, persistencia en el ambiente y su capacidad de bioacumulación. El quitosano es un polisacárido preparado a partir de la modificación del biopolímero quitina, que es el biopolímero más abundante después de la celulosa, sus grupos amino (-NH₂) e hidroxilo (-OH) pueden actuar como sitios de quelación para iones metálicos. En el presente trabajo se obtuvieron perlas de quitosano, que posteriormente fueron empleadas como adsorbentes mediante la exposición con soluciones de Pb (II) a 50 mgL⁻¹ a tres valores de pH diferentes (4.5, 5.0, 5.5), con el objetivo de analizar su eficiencia de remoción de Pb (II) en agua. Posterior a la adsorción, las perlas quitosano-plomo fueron puestas en contacto con una solución de HCl para identificar el proceso de desorción. La remoción de Pb (II) más alta (74.05%) fue observada a un valor de pH de 5.0. Se observó una capacidad de desorción de 5.01±0.83 mg/g, por las perlas probadas en el proceso de adsorción a un valor de pH de 5.5, representando un 54.0% con respecto a la capacidad de adsorción. Los resultados de la adsorción y desorción, permiten considerar al quitosano como una alternativa eficiente para la biorremediación o tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, además de sugerir el potencial de reúso del material para remover Pb (II) de aguas, contribuyendo de esta manera la economía y sustentabilidad del proceso.

Palabras clave: Quitosano, Metales pesados, Plomo, Adsorción, Desorción.

Currently, water pollution by heavy metals represents one of the most critical environmental problems worldwide due to its toxicity, persistence in the environment and its capacity for bioaccumulation. Chitosan is a polysaccharide prepared from the modification of the biopolymer chitin, which is the most abundant biopolymer after cellulose. Its amino (-NH₂) and hydroxyl (-OH) groups can act as chelation sites for metal ions. In the present research, chitosan beads were obtained, which were subsequently used as adsorbents by exposing them to Pb (II) solutions at 50 mgL⁻¹ at three different pH values (4.5, 5.0, 5.5), in order to analyze their Pb (II) removal efficiency in water. After adsorption, the chitosan-lead beads were placed in contact with an HCl solution to identify the desorption process. The highest Pb(II) removal (74.05%) was observed at a pH of 5.0. A desorption capacity of 5.01±0.83 mgg⁻¹ was observed for the beads tested in the adsorption process at a pH of 5.5, representing 59% of the adsorption capacity. The adsorption and desorption results allow chitosan to be considered an efficient alternative for bioremediation or treatment of water contaminated with heavy metals, in addition to suggesting the potential for reusing the material to remove Pb(II) from water, thus contributing to the economy and sustainability of the process.

Keywords: Chitosan, Heavy metals, Lead, Adsorption, Desorption.

Introducción

La contaminación por metales pesados procedentes de efluentes industriales constituye una grave amenaza para la salud humana y al medio ambiente [J. Li. X. Wang., *et al.*, 2018]. Los metales pesados se acumulan fácilmente en los organismos vivos a través de la cadena alimentaria causando diversas enfermedades y trastornos metabólicos [C. Zhu *et al.* 2016; W. Ouyang *et al.*, 2018]. Desafortunadamente, el uso de estos metales pesados no puede evitarse debido a su necesidad en diversos procesos y productos industriales como es en curtidurías, baterías, electrónicos, teñidos, fábricas textiles y otras industrias [K.H Vardhan *et al.*, 2019]. Estas industrias descargan metales pesados (generalmente en su forma iónica), como son el cromo (Cr), plomo (Pb), vanadio (V), molibdeno (Mo), zinc (Zn), níquel (Ni), mercurio (Hg), cobre (Cu), cadmio (Cd) y arsénico (As) en el medio ambiente y agua contaminada que se emplean posteriormente para riego y uso potable. Por lo anterior, es necesario desarrollar u optimizar métodos más eficaces y eficientes para eliminar los metales pesados de las aguas residuales industriales. Actualmente se utilizan diversos métodos de tratamiento para la eliminación de los metales pesados de las aguas residuales industriales, como son la precipitación química, el intercambio iónico [J. Kamcev *et al.*, 2015], la osmosis inversa [L. Gao *et al.*, 2021], la separación con membranas [Y. Zou *et al.*, 2017], la extracción con solventes [M. Yadav *et al.*, 2017] y la adsorción física [Z. Wei *et al.*, 2017; X. Zhu., *et al.*, 2016]. Entre estos métodos, la adsorción se usa ampliamente para eliminar metales pesados de soluciones acuosas debido a la abundante disponibilidad de materiales adsorbentes bajo costo y características físicas, químicas y superficiales favorables [S. Al-Asheh *et al.*, 2000; I. Sargin G. *et al.*, 2015]. Diferentes tipos de materiales como arcilla, zeolita, materiales lignocelulósicos, residuos agrícolas, biopolímeros, óxidos metálicos, microorganismos, biopolímeros, residuos de aguas residuales, cenizas volantes, carbón activado, hierro de valencia cero, se han utilizado con éxito como adsorbentes eficaces [M. Raii *et al.*, 2014]. El carbón activado es conocido como el material de eliminación de iones metálicos más popular [J.M. Dias *et al.*, 2007]. Sin embargo, sus altos costos hacen que sus aplicaciones prácticas [A. Ayoub *et al.*, 2013].

El quitosano es un polisacárido natural versátil obtenido a partir de la desacetilación de la quitina. La quitina es el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa, está compuesto por unidades de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina a través de enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4), sus grupos amino (-NH₂) e hidroxilo (-OH) pueden actuar como sitios de quelación para los iones metálicos, que puede extraerse principalmente de los caparazones de crustáceos, como cangrejos, camarones y langostas, también de las escamas de pescado y hongos, y tienen excelentes propiedades biológicas como son la biocompatibilidad, biodegradación y diversas funcionalidades, como actividad homeostática, antitrombogénica, mejora de la inmunidad, cicatrización de heridas e inhibición del crecimiento microbiano de algunas bacterias [H. Raham *et al.*, 2020], así como buena biodegradabilidad, nula toxicidad y bajo costo [Doshi *et al.*, 2018; Nerdy *et al.*, 2022; Nguyen & Bui, 2021; Nishad *et al.*, 2023; Novikov *et al.*, 2023]. Además, tiene un gran valor económico debido a sus excelentes propiedades químicas, biológicas y se aplica en áreas de biomédicas, agricultura e industriales [Ilyas *et al.*, 2021; Morin Crini *et al.*, 2019].

El quitosano es considerado un material adsorbente eficiente para la eliminación de iones de metales pesados debido a su hidrofilia dada por los grupos de amina reactivos no tóxicos y a sus propiedades quelantes [M. Ahmad *et al.*, 2015]. Además, el quitosano después de la modificación química de su estructura muestra propiedades excepcionales de unión de metales [M. Agarwal *et al.*, 2017; I. Sargin *et al.*, 2015]. El quitosano ayuda en la adsorción preferible para metales de transición por encima de los metales alcalinos y alcalinotérreos [C. Jeon *et al.*, 2003].

Metodología

Etapas 1: Obtención de perlas de quitosano

a. Preparación de solución de quitosano

Se agrega quitosano obtenido de desechos de exoesqueleto de *Litopenaeus setiferus* (camarón blanco), a una solución de ácido acético al 5%. Las condiciones de agitación para la mezcla fueron de 100 rpm, durante 1.5 horas.

b. Elaboración de perlas

La solución de quitosano previamente preparada se agrega gota a gota a una solución de NaOH para la formación de las perlas. El excedente de la solución de NaOH se remueve con agua desionizada y las perlas húmedas obtenidas se secan en una incubadora Felisa®.

Etapa 2: Prueba de adsorción de plomo

a. Preparación de soluciones de plomo

Se prepararon tres soluciones de plomo (Pb II) con una concentración de 50 mgL^{-1} a diferente pH cada una (4.5, 5.0 y 5.5 respectivamente). El pH de cada solución se ajustó con soluciones de HNO_3 y NaOH, empleando un potenciómetro Thermo Scientific®.

b. Interacción de las perlas con la solución de plomo

El proceso de absorción se probó mediante la interacción, agregando perlas de quitosano en cada una de las soluciones de plomo, contenidas en matraces Erlenmeyer de 500 mL. El tiempo de interacción fue de 24 horas en una incubadora orbital Thermo Scientific® con condiciones de agitación de 100 rpm y 25°C . Cada una de las pruebas se realizó por duplicado.

Etapa 3: Prueba de desorción

a. Interacción de las perlas de quitosano-plomo con la solución de HCl

Para la evaluación de la desorción, las perlas de quitosano-plomo obtenidas del proceso de adsorción de la tapa anterior, se pusieron en contacto con solución de HCl 0.5M, contenidos en tubos de polipropileno de 15 mL a cuatro diferentes tiempos: 30, 60, 120 y 240 min. La interacción se desarrolló bajo las mismas condiciones de la prueba de adsorción. Cada una de las pruebas se realizó por duplicado.

Etapa 4: Análisis mediante Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA)

Posterior a los procesos de adsorción y desorción de plomo por las perlas de quitosano, se separaron los sobrenadantes de las perlas. Para el análisis de EAA se emplearon los sobrenadantes de las muestras, para determinar la eficiencia de remoción, así como la capacidad de adsorción y capacidad de desorción de las perlas de quitosano.

La fórmula empleada para el cálculo de la capacidad de adsorción y la capacidad de desorción, es la siguiente:

$$Q = \frac{(C_i - C_f) V}{m}$$

Donde:

$Q \rightarrow$ Capacidad de adsorción (mgg^{-1})

$C_i \rightarrow$ Concentración inicial del soluto (absorbato) en la solución (mg)

$C_f \rightarrow$ Concentración final del soluto (mg)

$V \rightarrow$ Volumen de solución (L)

$m \rightarrow$ Masa del adsorbente (g)

Resultados y discusión

Etapas 1: Obtención de perlas de quitosano

Las perlas de quitosano obtenidas una vez secas presentaron las siguientes características: un tamaño homogéneo de $1\text{ mm} \pm 0.01$, una coloración amarillo paja y una consistencia firme al tacto. El tamaño obtenido por las perlas fue aceptable y puede ser usado en diferentes tipos de experimentos de adsorción, como en experimentos por lotes o columnas.

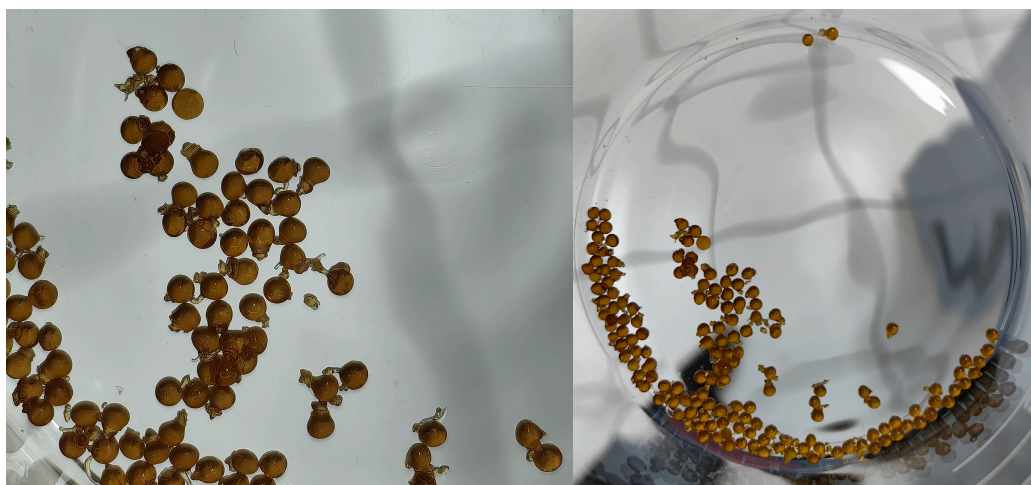


Figura 1. Apariencia física de las perlas de quitosano obtenidas. Elaboración propia.

Etapas 2: Prueba de adsorción de plomo

Los resultados de los análisis de adsorción mediante EAA para la cuantificación de las concentraciones de plomo de las pruebas de adsorción soluciones de Pb con las perlas de quitosano en los tres diferentes valores de pH se muestran en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Remoción de Pb usando perlas de quitosano secas a diferentes valores de pH a temperatura ambiente. Elaboración propia.

	pH	Concentración inicial de Pb		
Control	5.0	50.29 $\pm$ 1.83		
Perlas de quitosano		Concentración de Pb residual (mgL ⁻¹)	Absorción de Pb (mgL ⁻¹)	Q _{ADSORCIÓN} (mgg ⁻¹)
F1	4.5	13.38 $\pm$ 0.78	36.91 $\pm$ 0.78	9.23
F2	5.0	13.05 $\pm$ 0.66	37.24 $\pm$ 0.66	9.31
F3	5.5	13.11 $\pm$ 0.62	37.18 $\pm$ 0.62	9.30

Valores de capacidad de adsorción (mgg⁻¹) y concentración de Pb residual, representan el promedio de los duplicados $\pm$ su error estándar.

La remoción de Pb más alta (74.05%) fue observada a un valor de pH de 5.0, disminuyendo la concentración a un valor de 13.05 ± 0.66 de Pb (II), comparado con el control ($50.29 \pm 1.83\text{mgL}^{-1}$). (Figura 2).

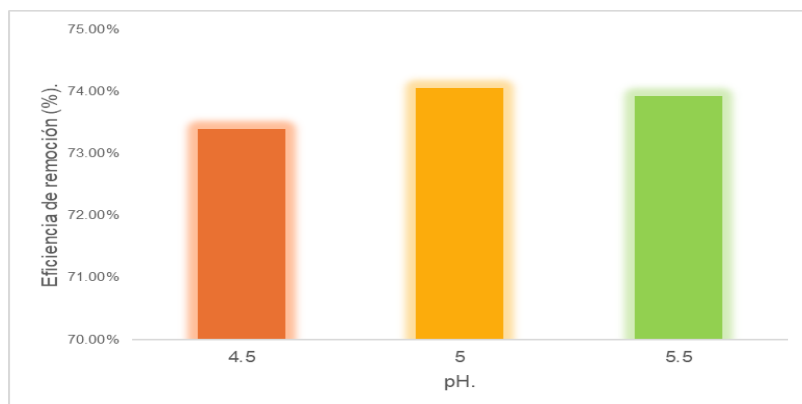


Figura 2. Eficiencia de remoción (%) de Pb para las perlas de quitosano a los tres diferentes valores de pH (Elaboración propia en Excel 2024). Elaboración propia.

Etapas 3: Prueba de desorción

En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos del proceso de desorción, observando el mayor valor de concentración de Pb desorbido ($25.05 \pm 0.83 \text{ mgL}^{-1}$), en un tiempo de 60 minutos, correspondiente a una capacidad de desorción de $5.01 \pm 0.83 \text{ mgg}^{-1}$, por las perlas obtenidas luego proceso de adsorción a un valor de pH de 5.5, y que representa un 59% con respecto a la capacidad de adsorción. También se observó la menor concentración de Pb desorbido ($11.17 \pm 3.44 \text{ mgL}^{-1}$) en un tiempo de 240 minutos, que corresponde a una capacidad de desorción de $2.23 \pm 3.44 \text{ mgg}^{-1}$ en las perlas obtenidas luego de la adsorción de Pb a un valor de pH de 4.5 (Tabla 2).

Tabla 2. Desorción de Pb por las perlas de quitosano con HCl 0.5 M en diferentes tiempos y cada uno de los valores de pH observados al final del proceso. Elaboración propia.

Perlas de quitosano - plomo obtenidas del proceso de adsorción a los diferentes valores de pH	Tiempo (min)	$Q_{\text{DESORCIÓN}} (\text{mgg}^{-1})$
4.5	30	2.45 ± 0.32
	60	2.42 ± 0.19
	120	2.41 ± 0.99
	240	2.23 ± 3.44
5.0	30	3.93 ± 3.43
	60	4.86 ± 0.09
	120	3.70 ± 1.13
	240	3.33 ± 0.07
5.5	30	4.63 ± 4.60
	60	5.01 ± 0.82
	120	4.13 ± 1.13
	240	3.34 ± 0.31

Valores de capacidad de desorción (mg/g), representan el promedio de los duplicados $\pm$ su error estándar.

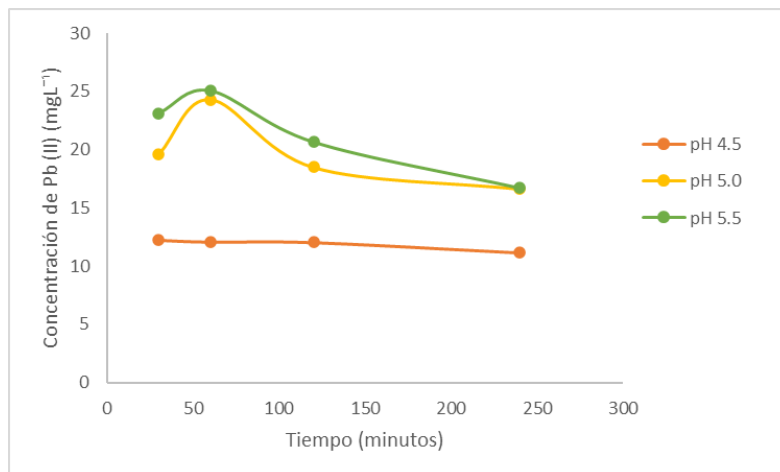


Figura 3. Concentración de desorción de Pb (II) por las perlas de quitosano con HCl 0.5M en diferentes tiempos a los tres diferentes valores de pH.
Elaboración propia.

La adsorción de metales pesados depende en gran medida de las condiciones de pH de la solución. En el presente trabajo se emplearon valores de pH dentro del intervalo de 4.5 - 5.5 en soluciones de plomo que interactuaron con las perlas de quitosano, obteniendo una eficiencia de remoción de 74.05%, (Cid. H et al., 2022). Demuestra que hay una mayor eficiencia en la remoción de Pb (II) cuando se encuentra dentro de este intervalo de pH.

A niveles muy bajos de pH existe una concentración elevada de iones hidrogeno en la solución, que da como consecuencia que algunos grupos funcionales del quitosano, como los grupos amino, lleven a cabo fácilmente la protonación y ocasiona la repulsión electrostática de los iones metálicos, generando una competencia entre los iones hidrogeno y los iones de Pb (II) por lo sitios de adsorción. Esto significa que la adsorción de metales como el Pb disminuye a valores de pH muy bajos (menores a 4).

A valores de pH superiores a 6, puede producirse una precipitación del metal debido a la formación de Pb (OH)₂. (Mohammad et al., 2022). Esta eficiencia de remoción obtenida por las perlas de quitosano obtenido de desechos de exoesqueleto de camarón blanco demostró ser eficiente en una solución acuosa a concentración de $50.29 \pm 1.83 \text{ mgL}^{-1}$ de Pb (II).

El proceso de desorción generalmente depende del valor de pH en el medio, del tipo de adsorbente y del agente de desorción utilizado. Los productos químicos adsorbidos no siempre se desorben fácilmente, pues algunas reacciones de adsorción son parcialmente irreversibles (Peter Olusakin et al., 2022).

El valor de pH de la solución en el proceso de desorción es uno de los parámetros más importantes de monitorear. Por esta razón, la variación en las capacidades de desorción a los diferentes tiempos depende del valor del pH observado en el medio, como se muestra en la Tabla 2, los ácidos minerales como el HCl pueden eliminar metales de los sitios de unión del adsorbente, solo se requiere un pequeño volumen de eluyente para desplazar todo el metal adsorbido. Pero, dado que la adsorción del metal puede ser un proceso reversible, la alta concentración del metal liberado en el medio puede reducir la eficiencia y capacidad de desorción, ya que aún queda algún residuo metálico en equilibrio (Tian L et al 2018).

Conclusiones

Las perlas de quitosano obtenido a partir de desechos de exoesqueleto de camarón blanco, mostraron tener una remoción de Pb (II) de 74.05% en una solución con concentración de 50.29 mgL^{-1} en un intervalo de pH de 4.5-5.5, con una capacidad de adsorción de 9.35 mg de Pb (II) g^{-1} de perlas de quitosano, esto representa

una alternativa eficiente para biorremediación o tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. La capacidad de desorción de las perlas puede ser de hasta 5.01 mg de Pb (II) g⁻¹ de perlas de quitosano, lo que representa el 54.0% de la capacidad de adsorción, que puede sugerir el reúso del material para remover Pb (II) de aguas, sumando de esta manera a la economía y sustentabilidad del proceso. Con el aprovechamiento de residuos sólidos como el exoesqueleto de camarón blanco, se puede generar un material sustentable como una potencial herramienta que puede ayudar en el tratamiento de aguas contaminadas, contribuyendo en soluciones que se integren al sistema de economía circular.

Agradecimientos

Los autores agradecen al comité de Veranos UG 2025 a la DAIP-UG por el apoyo otorgado, así como a la Secretaría del Estado de Guanajuato IdeaGTO, ya que este producto forma parte del proyecto Guanajuato Rumbo al Desarrollo Sustentable: caso de estudio Comunidades Sostenibles Etapa 2.0.

Bibliografía/Referencias

- M. Ahmad, S. Ahmed, B.L. Swami, S. Ikram. Adsorption of heavy metal ions: the role of chitosan and cellulose in water treatment. *Langmuir*, 79, 2015. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.2\(6\).280-89](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.2(6).280-89)
- M. Agarwal, K. Singh. Removal of heavy metals from wastewater using various adsorbents: a review. *J. Water Reuse Desal.*, 7(4), 2017. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.104>
- A. Ayoub, RA Venditti, JJ Pawlak, A. Salam, MA Hubbe. Novel Hemicellulose–Chitosan Biosorbent for Water Desalination and Heavy Metal. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 1 (9) (2013), págs. 1102-1109. <https://doi.org/10.1021/sc300166m>
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2010). Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment—A review. *Chemical Engineering Journal*, 157(2–3), 277–296. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.007>
- Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1–3), 219–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)
- Cid H, Ortiz C, Pizarro J, Moreno-Piraján JC (2020) Effect of copper (ii) biosorption over light metal cation desorption in the Surface of macrocystis pyrifera biomass. *J Environ Chem Eng* 8:103729. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103729>
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061–1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195–213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- C. Zhu, F. Liu, Y. Zhang, M. Wei, X. Zhang, C. Ling, A. Li. Nitrogen-doped chitosan-Fe(III) composite as a dual-functional material for synergistically enhanced co-removal of Cu(II) and Cr(VI) based on adsorption and redox. *Ing. J.*, 306 (2016), págs. 579-587. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.07.096>
- Demirbas, A. (2008). Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 157(2–3), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.024>
- Ding, Y., Liu, Y. G., Liu, S. B., Li, Z. W., Tan, X. F., Huang, X. X.,...Cai, X. X. (2016). Competitive removal of Cd(II) and Pb(II) by biochars produced from water hyacinths: performance and mechanism [Article]. *Rsc Advances*, 6(7), 5223-5232. <https://doi.org/10.1039/c5ra26248h>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). A short review of activated carbon assisted electrosorption process: An overview, current stage and future prospects. *Journal of Hazardous Materials*, 213–214, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.068>

- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2014). A review on environmental factors influencing the mechanism of adsorption of contaminants on activated carbon for wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.007>
- Igberase, E., Ofomaja, A., & Osifo, P. O. (2019). Enhanced heavy metal ions adsorption by 4aminobenzoic acid grafted on chitosan/epichlorohydrin composite: kinetics, isotherms, thermodynamics and desorption studies. *International journal of biological macromolecules*, 123, 664-676. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.082>
- JM Dias , MC Alvim-Ferraz , MF Almeida , J. Rivera-Utrilla , M. Sánchez-Polo. Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. *J. Medio Ambiente. Gestionar.* 85 (4) (2007) , págs. 833 – 846. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.031>
- Liu, Y., & Zhang, Y. (2019). Preparation of chitosan-based adsorbent and its application in wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 375, 122113. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122113>
- Mohamadi, M. A., Sayyad, G., & Najafi, P. (2019). Desorption Kinetics of Heavy Metals (Lead, Zinc, and Nickel) Coexisted with Phenanthrene from a Natural High Buffering Soil. *International Journal of Engineering (IJE)*, 32(12), 1716–1725. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.12c.04>
- Tian L, Liang Y, Lu Y, et al (2018) Pb(II) and Cu(II) Adsorption and Desorption Kinetics on Ferrihydrite with Different Morphologies. *Soil Sci Soc Am J* 82:96–105. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.08.0279>
- Wan Ngah, W. S., & Hanafiah, M. A. K. M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 3935–3948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>