



Análisis de la cinética de adsorción de cobre (II) con diferentes materiales: Una revisión bibliográfica

Analysis of the kinetics of copper (II) adsorption with different materials: A bibliographic review

Freddy Sánchez Moreira¹, Carlos Moreira Mendoza²

¹ Universidad Técnica de Manabí, Instituto de Posgrado, Maestría de Ingeniería Química, Portoviejo, Manabí, Ecuador. fsanchez8803@utm.edu.ec. ORCID: 0000-0002-4278-1971

² Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Física y Químicas, Dept. de Procesos Químicos, Portoviejo, Manabí, Ecuador. carlos.moreira@utm.edu.ec. ORCID: 000-0001-5980-0713

Resumen

La contaminación por metales pesados se ha convertido en uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad. El tratamiento de metales pesados es motivo de especial preocupación debido a su permanencia y persistencia en el ambiente. En los últimos años, se ha estudiado ampliamente a la adsorción como método para la eliminación del ion cobre (II) en soluciones acuosas. El objetivo de este trabajo fue analizar la cinética de adsorción del ion Cu (II) con diferentes materiales, determinando el sólido que adsorbe más al elemento antemencionado. Para ello, se revisó diez artículos científicos de reconocidos autores que, publicaron como parte de sus resultados las capacidades de adsorción máximas (q_{max}) de sus respectivos materiales evaluados, en función a las isotermas de adsorción que se correlacionaron mejor a las ecuaciones de Langmuir y Freundlich. Después se comparó las q_{max} de los estudios consultados a través de un gráfico estadístico. Por último, se concluyó que la mayor capacidad de adsorción máxima de Cu (II) fue de 980,90 mg/g, lo utilizado en perlas reticuladas de quitosano con carbón activado por lodo residual.

Palabras clave: Adsorbente; capacidad de adsorción máxima; metales pesados; soluciones acuosas.

Abstract

Heavy metal pollution has become one of the most serious environmental problems today. Treatment of heavy metals is of particular concern because of their permanence and persistence in the environment. In recent years, adsorption has been studied extensively as a method for the removal of copper (II) ion in aqueous solutions. The objective of this work was to analyze the adsorption kinetics of the Cu (II) ion with different materials, determining the solid that adsorbs the most to the element. For this, ten scientific articles by renowned authors were reviewed who published as part of their results the maximum adsorption capacities (q_{\max}) of their evaluated materials, based on the adsorption isotherms that were better correlated to the Langmuir and Freundlich equations. Afterwards, the q_{\max} of the consulted studies were compared through a statistical graph. Finally, it was concluded that the highest maximum adsorption capacity of Cu (II) was 980.90 mg / g, used in chitosan beads with waste active sludge char.

Keywords: Adsorbent; maximum adsorption capacity; heavy metals; aqueous solutions.

Introducción

Debido a la alarmante tasa de industrialización global, la introducción de sustancias venenosas en el ambiente se ha convertido en una amenaza para las plantas, los animales y los seres humanos (Celemín *et al.*, 2019). Así, iones de metales pesados descargados en los alrededores han causado un serio desafío al ambiente como resultado de su habilidad para transformarse en materiales dañinos para la salud (Vullo, Ceretti, Daniel, Ramírez & Zalts, 2008). Entre los iones de metales pesados más comunes que se encuentran en las aguas están el cobre, mercurio, cadmio, zinc, plomo, cromo y níquel (Fu & Wang, 2011). El cobre (Cu) es uno de los más elementos importantes en las actividades del cuerpo humano (Victorava & Feoktistova, 2018), sin embargo, este elemento químico ingerido en cantidades excesivas puede conducir a problemas de graves de salud como convulsiones, vómitos, calambres y eventualmente la muerte (Paulino *et al.*, 2006). Con el propósito de disminuir esta problemática se han empleado distintas tecnologías, como, por ejemplo, procesos de oxidación avanzada (Deng

& Zhao, 2015), las filtraciones de membrana (Jepsen, Hansen, Mai & Yang, 2016) y los procesos biotecnológicos microbiológicos (Turkayeva *et al.*, 2017).

En la comunidad científica, se ha comprobado que todos estos métodos convencionales son efectivos, sin embargo, algunos de ellos no son siempre apropiados y su empleo requiere de un elevado costo energético y de reactivos (Vizcaino & Molina, 2015). En este contexto, surge la adsorción como una alternativa más técnica y viable debido a la disponibilidad de materias primas (Tejada-Tovar, Villabona-Ortiz & Garcés-Jaraba, 2015). En la última década, se han incrementado el desarrollo de diferentes estudios dirigidos a la cinética de adsorción que implican componentes renovables, económicos y efectivos al momento de tratar matrices de agua con el cobre (Castellar-Ortega *et al.*, 2019). Por consiguiente, el objetivo fundamental de esta investigación es analizar la cinética de adsorción de cobre (II) con diferentes materiales, determinando el sólido que adsorbe más al elemento antemencionado.

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) por perlas de alginato de calcio dopadas con ácido etilendiaminotetraacético

En 2015, se realizó una investigación con perlas de alginato de calcio dopadas con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), mismas que se usaron en la separación de iones de Cu (II) a partir de solución acuosa en un sistema *batch* o por lotes. En los resultados finales, se determinó que el pH óptimo para la adsorción de los iones de Cu (II) es 5, y el tiempo en el que se alcanzó el equilibrio de adsorción fue a los 150 minutos. Además, el análisis de las isothermas experimentales de adsorción enlazadas con el modelo de Langmuir, permitió determinar que la mejor capacidad de adsorción les correspondió a las perlas generadas con la dosificación de 1,5 g de EDTA a la concentración de 300 g de Cu /L. Finalmente, se concluyó que para estas clases de perlas la máxima capacidad de adsorción (q_{max}) fue de 5,73 mg/g (Tapia, Vilca, Yarango & Rojas, 2015).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) a partir de hojas de eucalipto rojo en soluciones acuosas

Un estudio de investigación del 2017 informa que, se evaluó la eliminación de Cu (II) en soluciones acuosas utilizando hojas de eucalipto rojo (*Eucalyptus camaldulensis*). Las experimentaciones de adsorción se hicieron en un sistema por lotes. El equilibrio de adsorción se alcanzó en un tiempo de contacto de 30 minutos, a un pH de 6 y una dosificación del adsorbente de 0,5g, en función de una concentración de 50 mg de Cu/L. Los datos de estudios cinéticos y de equilibrio se ajustaron mejor para el modelo de isoterma de con capacidad máxima de adsorción (q_{max}) de 71 mg/g para el Cu (II) (Ezzeddine *et al.*, 2017).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) en soluciones acuosas a partir de bauxita

Un trabajo de 2017 evaluó a través de ensayos en soluciones acuosas la remoción del ion Cobre (II) utilizando bauxita, mineral compuesto mayoritariamente por alúmina (Al_2O_3) y, en menor medida, óxido de hierro y sílice. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en sistema por lotes. Los resultados de esta investigación reportaron que la bauxita fue un adsorbente relativamente efectivo para la eliminación del Cu (II), alcanzando la máxima remoción con los siguientes parámetros: pH 7, tiempo de contacto, 60 minutos, dosis de adsorbente 30 g, bajo una concentración de 24 mg de Cu/L. Los datos cinéticos que describieron mejor este proceso de adsorción fue el de modelo de Langmuir. La capacidad máxima de adsorción utilizando la bauxita como adsorbente fue de 9,11 mg/g (Atasoy & Bilgiç, 2018).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) mediante celulosa regenerada y alginato de sodio químicamente modificado con polietilenimina

En 2018, un artículo científico reporta que, la celulosa reticulada y alginato de sodio (SA) se modificó con polietilenimina (PEI) como adsorbente (PEI-RCSA) para la remoción del Cu (II) en una solución acuosa. La experimentación se llevó a cabo en un sistema por lotes y alcanzó la máxima adsorción en las siguientes condiciones: pH de 5,5, tiempo de contacto de 480 min, y dosis de adsorbente de 1 g; a una concentración de 800 mg de Cu/ L. El modelo de Langmuir describió con éxito las isotermas de adsorción en un único sistema de solución acuosa. La

capacidad máxima de adsorción (q_{\max}) de PEI-RCSA para Cu (II) acuoso fue de 177,1 mg/g (Zhan *et al.*, 2018).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) a partir de la cáscara de mazorca de cacao en soluciones acuosas

En 2018, un artículo científico reporta que, la cáscara de la mazorca de cacao (*Theobroma cacao*) fue utilizada para adsorber el ion de Cu (II) en soluciones acuosas en un sistema por lotes. Las condiciones óptimas de este proceso de adsorción fueron las siguientes: concentración de 30 mg de Cu/ L, dosis de adsorbente 4g, pH 7,5 y tiempo de contacto 15 minutos. La isoterma de Langmuir arrojó un mejor ajuste de equilibrio sobre los datos cinéticos experimentales. La capacidad máxima de adsorción (q_{\max}) para el Cu (II) fue de 4,69 mg/g (Obike *et al.*, 2018).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) sobre carbón activado de mesembrisantemo

Una investigación de 2019 reporta que, se hizo un trabajo de adsorción de ión Cu (II) sobre carbón activado de mesembrisantemo (*Mesembryanthemum*) en un experimento por lotes teniendo en cuenta la dosis del adsorbente (1 g), la concentración de la disolución (50 mg de Cu /L), el pH (5) y el tiempo de contacto (1140 minutos). El modelo de isoterma de Freundlich dio un mejor ajuste de los datos experimentales comparado con el modelo de Langmuir. El valor máximo de capacidad de adsorción (q_{\max}) de Cu (II) sobre carbón activado de mesembrisantemo fue de 45,45 mg/g (Alkherraz, Elsherif & Ali, 2019).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) en soluciones acuosas a partir de la cáscara de semilla de girasol

Abdulhussein & Alwared (2019) efectuaron una investigación que presentó la posibilidad de utilizar la cáscara de semilla de girasol (*Helianthus annuus*) como adsorbente para la eliminación del ión Cu (II) de una solución acuosa. Se llevó a cabo una serie de experimentos en un reactor por lotes para la obtención de los datos de equilibrio de adsorción. Con el propósito de determinar las condiciones óptimas del proceso, se evaluaron parámetros experimentales como la dosis del adsorbente, el pH, la concentración inicial del ion metálico y el tiempo de contacto,

dando por conclusión que las mejores condiciones fueron 7 g, 5, 10 mg de Cu /L, y 120 minutos respectivamente. Bajo estos parámetros, la capacidad máxima de adsorción (q_{max}) calculada a partir del modelo de Langmuir fue de 23,49 mg/g (Abdulhussein & Alwared, 2019).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) sobre perlas reticuladas de quitosano con carbón activado por lodo residual (WASC) en soluciones acuosas

En 2019, se evaluó la composición de perlas reticuladas de quitosano con Carbón Activado por Lodo Residual (*Waste Active Sludge Char: WASC*) como un nuevo adsorbente para la eliminación de iones Cu (II) en soluciones acuosas. Los datos de experimentación se ajustaron mejor al modelo de isoterma de Freundlich. Las condiciones óptimas del procesos de adsorción (dosis de adsorbente de 0,25g, tiempo de contacto 180 min, pH 5, concentración 300 mg de Cu/L) indicaron que las perlas WASC fueron capaces de alcanzar una capacidad máxima de adsorción (q_{max}) de 980,80 mg de Cu (II) /g (Dandil, Akin Sahbaz & Acikgoz, 2019).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) a partir de hojas de flamboyán en soluciones acuosas

Un trabajo investigativo realizado en 2020 desarrolló el proceso de adsorción del ion Cu (II) mediante hojas de flamboyán (*Delonix regia*) en soluciones acuosas. Las experimentaciones de adsorción se hicieron en un sistema por lotes. Los resultados obtenidos mostraron que la adsorción en equilibrio se alcanzó en las siguientes condiciones: 0,5 g de adsorbente a pH 4 y tiempo de contacto de 30 minutos, bajo una concentración de 100 mg de Cu/ L. Finalmente, los autores reportaron que el modelo de Langmuir se ajustó mejor para los datos de isotermas del Cu (II), detallando que la capacidad máxima de adsorción (q_{max}) para este ion fue de 9,12 mg/g (Babalola *et al.*, 2020).

Estudio cinético de la adsorción de Cu (II) en soluciones acuosas a partir de lignosulfonato / quitosano

En 2020, se desarrolló un trabajo de investigación con el fin de estudiar la eliminación de iones de Cu (II) sobre la preparación de un adsorbente compuesto por lignosulfonato y quitosano mediante polimerización radical simple de ácido acrílico en un sistema *batch*. Se considera que la

gran superficie porosa del adsorbente proporcionó más sitios de adsorción para los iones del cobre. Los datos experimentales de este proceso de adsorción se ajustaron mejor al modelo de Langmuir. La capacidad máxima de adsorción fue de 283 mg de Cu/g, y se alcanzó en las siguientes condiciones: pH 6, dosis de adsorbente de 0,03 g, tiempo de contacto 60 minutos, en función de una concentración de Cu (II) de 100 mg/L (Mu, Liu, Chen, Wang & Yang, 2020).

Metodología

El presente trabajo corresponde a una investigación de carácter analítico – descriptivo. Inicialmente, se buscaron estudios elaborados con las palabras claves adsorción de cobre (II). Luego, se seleccionó diez artículos científicos desarrollados entre los años 2015 y 2020 y, a la vez, que estos estuviesen indizados al menos en una de las siguientes bases de datos multidisciplinarias o especializadas: Scopus, ScienceDirect, Science Gate, Latindex y Google Scholar. Además, se tomó en cuenta que los autores hayan publicado como parte de sus resultados las capacidades de adsorción máximas (q_{max}) de sus respectivos materiales evaluados operados en soluciones acuosas bajo sistemas por lotes, y que fueron correlacionados en base a las isothermas de adsorción de los modelos de Langmuir y Freundlich. Luego, se comparó las q_{max} de los estudios consultados con la ayuda de un gráfico estadístico. Los fundamentos teóricos son los siguientes:

Isotermas de adsorción

Los modelos de isoterma de adsorción describen las capacidades del adsorbente y el adsorbato, que generalmente son la proporción entre la cantidad adsorbida y la que quedó en una solución en equilibrio a una temperatura fija (Figuroa, Moreno & Angelina, 2015). Los modelos de isothermas de adsorción más comunes para correlacionar los datos en sistemas por lotes son Langmuir y Freundlich (Ramón de los Santos, Barajas, Pérez, Hernández & Díaz, 2019).

Modelo Langmuir

La isoterma de Langmuir se basa en la presunción de que todos los puntos de adsorción en un adsorbente estructuralmente homogéneo son idénticos y energéticamente equivalentes (Salas-Tort, Marzal-Blanco & Penedo-Medina, 2012). La adsorción se realiza en una capa monomolecular sin interacciones laterales entre moléculas de adsorbato sobre una superficie energéticamente homogénea (Medina, Cutiño, Vendrell & Tort, 2015). La capacidad saturada se puede expresar como la forma lineal de la ecuación de Langmuir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (I)$$

donde C_e es la concentración de equilibrio de adsorbato (mg/L), q_e es la cantidad de adsorbato de equilibrio por unidad peso del adsorbente (mg/g), q_{max} es la capacidad del adsorbente (mg/g) y K_L es la constante de adsorción de Langmuir (L/mg); q_{max} y K_L se calculan trazando C_e / q_e vs. C_e (Langmuir, 1918).

Modelo Freundlich

El modelo Freundlich se aplica en el equilibrio de adsorción de gases sobre sólidos y en la adsorción de sustancias en disolución sobre adsorbentes sólidos (Rojas, Diaz, Medina & Rodriguez, 2012). La isoterma de Freundlich describe la adsorción sobre una superficie energéticamente heterogénea (Lazo, Navarro, Sun-Kou & Llanos, 2008). En este modelo aparecen constantes que relacionan la capacidad de adsorción multicapas y la intensidad de la adsorción (Dada, Olalekan, Olatunya & Dada, 2012). La forma lineal de la isoterma se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (II)$$

donde q_e es la concentración de iones de equilibrio en el adsorbente (mg/g), C_e es la concentración de iones de equilibrio en solución (mg/L); K_F (L/g) y n son constantes de Freundlich. K_F y n indican la capacidad de adsorción del adsorbente y una medida de la desviación de la linealidad de la adsorción, respectivamente. Cuando $\ln q_e$ se traza vs. $\ln C_e$, K_F y n son calculados a partir de la intersección y la pendiente del modelo de regresión (Rivas, Núñez, Longoria & González, 2014).

Resultados

En la Tabla 1 se muestran organizadamente los datos de interés que fueron proporcionados por los autores en los resultados de sus trabajos de investigación; en ésta se especifica los adsorbentes empleados con las condiciones óptimas para obtener una mayor remoción de Cu (II) y las capacidades máximas de adsorción.

Tabla 1

Datos experimentales de los artículos científicos

Autores/año	Adsorbente	Condiciones óptimas para mayor adsorción				Capacidad máxima de adsorción (mg de Cu/g de adsorbente)
		Concentración de la disolución (mg de Cu/ L)	Dosis de adsorbente (g)	pH	Tiempo de contacto (min)	
Tapia, Vilca, Yarango, & Rojas, 2015	Perlas de alginato de calcio dopadas con EDTA	300	1,5	5	150	5,73
Ezzeddine <i>et al.</i> , 2017	Hojas de eucalipto rojo	50	0,5	6	30	71
Atasoy & Bilgiç, 2018	Bauxita	24	30	7	60	9,11
Zhan <i>et al.</i> , 2018	PEI-RCSA	800	1	5,5	480	177,1
Obike <i>et al.</i> , 2018	Cáscara de mazorca de cacao	30	4	7,5	15	4,69
Alkheraz, Elsharif, & Ali, 2019	Carbón activado de mesembrisantemo	50	1	5	1140	45,45
Abdulhussein & Alwared, 2019	Cáscara de semilla de girasol	10	7	5	120	23,49

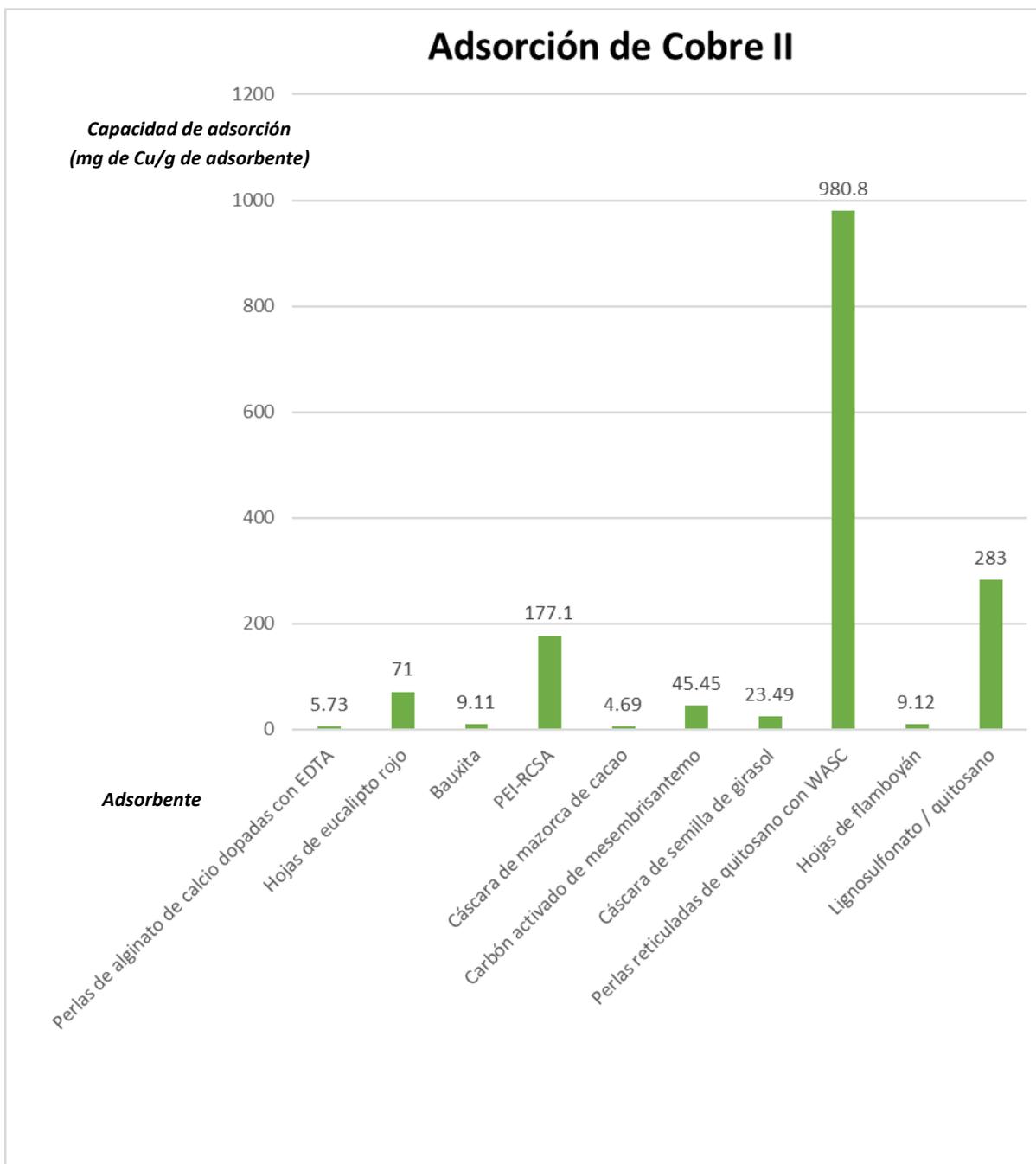
Dandil, Akin Sahbaz, & Acikgoz, 2019	Perlas reticuladas de quitosano con WASC	300	0,25	5	180	980,80
Babalola <i>et al.</i> , 2020	Hojas de flamboyán	100	0,5	4	30	9,12
Mu, Liu, Chen, Wang, & Yang, 2020	Lignosulfonato / quitosano	100	0,03	6	60	283

Por otro lado, la Figura 1 muestra un gráfico estadístico en el que están representadas las capacidades de adsorción máxima (q_{max}) de Cu (II) según los materiales de los estudios reportados anteriormente. Como puede apreciarse, según los resultados de los trabajos de investigación consultados, la menor capacidad máxima de adsorción (q_{max}) del ion Cu (II) fue de 4,69 mg/g, correspondiente al estudio con la cáscara de mazorca de cacao. Del mismo modo, los estudios de adsorción de Cu (II) con hojas de flamboyán, bauxita y con perlas de alginato de calcio dopadas con EDTA, con capacidades de adsorción máxima (q_{max}) de 9,12 mg/g, 9,11 mg/g, y 5,73 mg/g respectivamente, ocuparon de forma ascendente el séptimo, octavo y noveno lugar.

En este mismo sentido, el tercer, cuarto, quinto y sexto lugar les correspondió a los estudios de adsorción de Cu (II) sobre PEI_RCSA (177,1 mg/g), hojas de eucalipto rojo (71 mg/g), carbón activado de mesembrisantemo (45,45 mg/g) y cáscara de semilla de girasol (23,49 mg/g) respectivamente. El estudio investigativo de remoción de Cu (II) en el que emplearon lignosulfonato/quitosano como adsorbente, representó el segundo estudio que reportó una mayor capacidad de adsorción máxima (q_{max}) con 283 mg/g. Con referencia a, los artículos científicos evaluados, el estudio que reporta la mayor capacidad de adsorción máxima de Cu (II) es el que se realizó con perlas reticuladas de quitosano con Carbón Activado por Lodo Residual (WASC) con una q_{max} de 980,80 mg/g.

Figura 1

Adsorción de Cu (II) en diferentes materiales



Conclusiones

Científicamente, la adsorción es una de las técnicas más usadas para la eliminación y reducción del ion de Cu (II) utilizando diferentes materiales, mismos que comúnmente son sometidos a evaluaciones con soluciones acuosas y en función de distintos parámetros. Los resultados de las experimentaciones revisadas son arrojados en modelos de isothermas de adsorción que describen la cantidad adsorbida y la cantidad de solución en equilibrio a una temperatura fija, convirtiéndose esta relación en la capacidad máxima de adsorción.

Al comparar los trabajos de investigación indagados, el estudio que especificaba el material con mayor capacidad de adsorción máxima fue el elaborado por Dandil *et al.*, (2019), mismo que utilizó perlas reticuladas de quitosano con Carbón Activado por Lodo Residual (WASC), reportando una q_{max} de 980,80 mg/g. A diferencia de los otros trabajos de investigación, la mayor capacidad máxima de adsorción fue debido a que el material empleado se obtuvo al combinar las propiedades de dos adsorbentes (quitosano y carbón activado a partir de residuos residuales) que, según el autor del artículo basado en otras investigaciones, son altamente removedores del ion Cu (II) en soluciones acuosas.

Referencias Bibliográficas

- Abdulhussein, S. & Alwared, A. (2019). Single and Binary Adsorption of Cu(II) and Ni(II) Ions from Aqueous Solutions by Sunflower Seed Husk. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 26 (1), 35-43.
<https://doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.1.005>
- Alkherraz, A., Elsherif, K., & Ali, A. (2019). Equilibrium and thermodynamic studies of Pb(II), Zn(II), Cu(II) and Cd(II) adsorption onto mesembryanthemum activated carbon. *Journal of Medicinal and Chemical Sciences*, 3, 1-10.
<https://doi.org/10.33945/SAMI/JMCS.2020.1.1>

- Atasoy, A. & Bilgiç, B. J. (2018). Adsorption of Copper and Zinc Ions from Aqueous Solutions Using Montmorillonite and Bauxite as Low-Cost Adsorbents. *Mine Water and the Environment*, 37, 205-210.
- Babalola, B., Babalola, B.M., Babalola, A. O., Akintayo, C. O., Lawal, O. S., Abimbade, S. F., Oseghe, E. O., Akinola, L.S. & Ayanda, O.S. (2020). *Drinking Water Engineering and Science*. Adsorption and desorption studies of Delonix regia pods and leaves: removal and recovery of Ni(II) and Cu(II) ions from aqueous solution. 13 (2), 15-27. <https://doi.org/10.5194/dwes-13-15-2020>
- Castellar-Ortega, G., Mendoza C, E., Angulo M, E., Paula P, Z., Rosso B, M., & Jaramillo C, J. (2019). Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca. *Revista MVZ Córdoba*, 24(2), 7231-7238. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1700>
- Celemín, S.A., Cárdenas, M., Bernal, L. y Rodríguez, M. (2019). Evaluación del nivel de uso y el efecto de los agroquímicos sobre dos sistemas de producción agropecuaria en la sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Zootecnia*, 5(9), 33-40.
- Dada, A.O, Olalekan, A., Olatunya, A., & Dada, O. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *Journal of Applied Chemistry*, 3 (1), 38-45. <https://doi.org/10.9790/5736-0313845>
- Dandil, S., Akin Sahbaz, D., & Acikgoz, C. (2019). Adsorption of Cu(II) ions onto crosslinked chitosan/Waste Active Sludge Char (WASC) beads: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 668-675. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.063>
- Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167-176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>

- Ezzeddine, Z., Sayed, E. A., Rammal, H., Hijazi, A., Hamad, H., Akhdar, H. (2017). Bioadsorption of Pb²⁺ and Cu²⁺ on Eucalyptus Camaldulensis Leaves. *International Journal of Environment, Agriculture & Biotechnology*. 2 (3), 2569-2572. <https://doi.org/10.22161/ijeab/2.5.38>
- Figueroa, D., Moreno, A., & Angelina, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14 (26), 105-120. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n26a7>
- Fu, F. & Wang, Q. (2011). Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Obike, A.I, Igwe, J.C., Emeruwa, C.N. & Uwakwe, K.J. (2018). Equilibrium and Kinetic Studies of Cu (II), Cd (II), Pb (II) and Fe (II) Adsorption from Aqueous Solution Using Cocoa (Theobroma cacao) Pod Husk. *Journal of Applied Science of Environmental Management*, 22 (2), 182-190. <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v22i2.5>
- Jepsen, K. L., Hansen, L., Mai, C., & Yang, Z. (2016). Challenges of membrane filtration for produced water treatment in offshore oil & gas production. *Oceans 2016 MTS/IEEE Monterrey*. 1-8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761443>
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Lazo, J., Navarro, A. E., Sun-Kou, M. d. R., & Llanos, B. P. (2008). Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 74(1), 3-19.
- Medina, M., Cutiño, E., Vendrell, F. & Tort, D. (2015). Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. *Tecnología Química*, 35 (1), 110-124.

- Mu, R., Liu, B., Chen, X., Wang, N., & Yang, J. (2020). Adsorption of Cu (II) and Co (II) from aqueous solution using lignosulfonate/chitosan adsorbent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.260>
- Paulino, A., Minasse, F., Guilherme, M., Reis, A., Muniz, E., & Nozaki, J. (2006). Novel Adsorbent Based on Silkworm Chrysalides for Removal of Heavy Metals from Wastewaters. *Journal of Colloid and Interface Science*, 301 (2), 479-487. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.05.032>
- Ramón de los Santos, C., Barajas, J., Pérez, G., Hernández, M. Á. & Díaz, L. L. (2019). Adsorción de cobre (II) y cadmio (II) en suspensiones acuosas de CaCO₃ biogénico nanoestructurado. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(1), 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.003>
- Rivas, C. F., Núñez, O., Longoria, F. & González, L. (2014). Isotherma de langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃. *Saber*, 26 (1), 43-49.
- Rojas, N., Diaz, P. V., Medina, E. C., & Rodríguez, A. S. V. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, 14(1), 109-129.
- Salas-Tort, D., Marzal-Blanco, N. & Penedo-Medina, M. (2012). Estudio preliminar de la adsorción de níquel y cobalto utilizando carbón vegetal de conchas de coco. *Tecnología Química*, 32 (2), 197-209.
- Tapia, N., Vilca, L., Yarango, A. & Rojas, N. (2015). Estudio de la adsorción de Cu (ii) por perlas de alginato de calcio dopadas con EDTA. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 18(1), 23–28.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á. & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*. 18 (34), 109-123.



- Turkayeva, A., Jamalova, G., Mussina, U., Oshakbayev, M., Timma, L., Pubule, J. & Blumberga, D. (2017). Chemical and Microbiological Nature of Produced Water Treatment Biotechnology. *Energy Procedia*, 113, 116-120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.032>
- Victorava, L. F. & Feoktistova, Y. C. (2018). El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana. *MediSur. Revista de Ciencias Médicas de Cienfuegos*. 16(4), 579-587.
- Vizcano, L., & Molina, N. (2015). Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 43-60. <https://doi.org/10.18359/rcin.432>
- Vullo, D. L., Ceretti, H. M., Daniel, M. A., Ramírez, S. A. & Zalts, A. (2008). Cadmium, zinc and copper biosorption mediated by *Pseudomonas veronii* 2E. *Bioresource Technology*, 99(13), 5574-5581. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.060>
- Zhan, W., Xu, C., Qian, G., Huang, G., Tang, X., & Lin, B. (2018). Adsorption of Cu(ii), Zn(ii), and Pb(ii) from aqueous single and binary metal solutions by regenerated cellulose and sodium alginate chemically modified with polyethyleneimine. *RSC Advances*, 8(33), 18723-18733. <https://doi.org/10.1039/C8RA02055H>