



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

---

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADOS**

**REMOCIÓN DE CADMIO (II) EN SOLUCIÓN  
ACUOSA POR ADSORCIÓN SOBRE  
HIDROCARBONIZADO DE LIRIO ACUÁTICO.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:**

**I.Q CAROLINA VÁZQUEZ MENDOZA**

DIRECTOR:

**DR. ROBERTO LEYVA RAMOS**



**SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P**

**AGOSTO, 2021**

---



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADOS



**REMOCIÓN DE CADMIO (II) EN SOLUCIÓN ACUOSA POR  
ADSORCIÓN SOBRE HIDROCARBONIZADO DE LIRIO  
ACUÁTICO.**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**I.Q CAROLINA VÁZQUEZ MENDOZA**

**DIRECTOR:**

**DR. ROBERTO LEYVA RAMOS**

**SINODALES:**

Dr. Roberto Leyva Ramos

Presidente

---

Firma

Dra. María Selene Berber Mendoza

---

Firma

Dr. Pedro Antonio Alonso Dávila

---

Firma

Dr. Nahúm Andrés Medellín Castillo

---

Firma

El programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACYT, registro 000896, en el Nivel Consolidado.

Número de registro de la beca otorgada por CONACYT: 828880



Remoción de cadmio (II) en solución acuosa por adsorción sobre hidrocarbonizado de lirio acuático por Vázquez Mendoza Carolina se atribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

San Luis Potosí S.L.P. México

Agosto, 2021

**Comité Académico del Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química**

**Facultad de Ciencias Químicas**

**Presente. \_**

Por medio de la presente comunicamos que la tesis llevada a cabo por la alumna de Maestría IQ. Carolina Vázquez Mendoza, titulada “REMOCIÓN DE CADMIO (II) EN SOLUCIÓN ACUOSA POR ADSORCIÓN SOBRE HIDROCARBONIZADO DE LIRIO ACUÁTICO”, ha sido concluida y aprobada por el comité tutorial para iniciar los trámites correspondientes para su titulación, la cual tendrá lugar el próximo día 10 de agosto del 2021 a las 17:00 horas en el auditorio chico de la facultad.

Dr. Roberto Leyva Ramos

Presidente FCQ/UASLP

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. María Selene Berber Mendoza

Miembro FCQ/UASLP

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Pedro Antonio Alonso Dávila

Miembro FAC. de INGENIERÍA/UASLP

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Nahúm Andrés Medellín Castillo

Miembro FAC de INGENIERÍA/UASLP

\_\_\_\_\_  
Firma

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados en México es un problema que ha estado aumentando debido a las actividades antropogénicas, específicamente la minería. Los metales contaminantes más importantes en México, dada su toxicidad y abundancia son: mercurio, plomo, cadmio y cromo. En México, los sitios más afectados por las altas concentraciones de metales pesados en suelos se encuentran en los estados de Zacatecas, Querétaro, Hidalgo y San Luis Potosí.

Entre los metales más tóxicos para el ser humano se encuentran Cd(II), Hg(II) y Pb(II), son peligrosos ya que presentan varias de las características más dañinas de un compuesto tóxico. Primeramente, causan efectos adversos al ser humano provocando alteraciones a nivel enzimático, renal, respiratorio y digestivo. Además, se pueden bioacumular, son persistentes en el medio ambiente y pueden ser transportados largas distancias gracias al viento y las corrientes y fuentes de agua.

Una alternativa para reducir la contaminación de metales pesados es el uso de especies vegetales para eliminar a los metales pesados tanto del agua como del suelo. En México, se han caracterizado varias especies vegetales con capacidad para bioacumular metales pesados tales como *Scirpus americanus*, *Typha latifolia*, *Jatropha dioica*, *Eichhornia crassipes* y *Amaranthus hybridus*. El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es una planta invasiva, la cual puede causar un impacto negativo en lagos y charcas, sino se mantienen bajo control. El lirio acuático puede cubrir completamente fuentes de agua superficial, impidiendo que la luz del sol llegue a las plantas acuáticas nativas afectando la fotosíntesis y agotando el oxígeno del agua. Esta planta presenta alta capacidad de captación de metales pesados tales como Cd(II), Cr(III), Co(II), Ni(II), Pb(II) y Hg(II), y puede ser utilizada para la biorremediación de aguas residuales industriales y suelos contaminados.

En la carbonización hidrotermal (CHT), la materia orgánica se descompone bajo la influencia de la temperatura y en presencia de agua. El agua se encuentra a una temperatura por encima de su punto de ebullición y la presión del sistema es autógena. La CHT es un proceso exotérmico capaz de reducir la cantidad de oxígeno e hidrógeno del material carbonoso generado respecto al del material precursor. La degradación de la biomasa empieza con una reacción de hidrólisis que requiere baja energía de activación. Los componentes de la biomasa

resultan menos estables, por tanto, se requieren menores temperaturas de reacción. En este proceso, se transforma casi todo el carbono del material vegetal en un material carbonoso (100 % eficacia en cuanto al uso del carbono); todo esto, sin liberar ni CO<sub>2</sub>, ni metano. El hidrocarbonizado (HC) es distinto del biocarbonizado (BC) debido a su proceso de producción y sus propiedades, y el HC típicamente tiene mayores relaciones H/C y menor aromaticidad que el BC, así como escasas o ninguna estructura de anillo aromático. El HC tiene muchas aplicaciones ya que puede ser utilizado para propósitos energéticos, procesos de mejoramiento del suelo, y también, produciendo adsorbentes, catalizadores y materiales nanoestructurados.

La adsorción es una de las principales aplicaciones de los materiales carbonosos. Al contrario que los carbones activados, el HC hidrotratado a 180 °C no presentan microporosidad, pero contiene un gran número de grupos oxigenados localizados en la superficie, favoreciendo la adsorción de metales pesados.

El objetivo principal de este trabajo es sintetizar un hidrocarbonizado de lirio acuático (HCLA) por medio de un tratamiento hidrotermal del lirio acuático natural (LAN) y modificar el LAN y HCLA con solución de ácido cítrico (AC) para incrementar la capacidad para adsorber Cd(II). Los materiales de LAN y HCLA modificados con ácido cítrico se designaron como HCLA-AC y LAN-AC. Los adsorbentes preparados se caracterizaron por diversas técnicas analíticas. Se determinaron las capacidades de LAN, LAN-AC, HCLA y HCLA-AC para adsorber Cd(II) y otros metales en solución acuosa y las capacidades de adsorción decrecieron en el orden siguiente HCLA-AC > LAN-AC > HCLA > LAN. Se analizaron los efectos de las condiciones de operación en las capacidades de adsorción de los materiales adsorbentes y se elucidó el mecanismo de adsorción de Cd(II) sobre los cuatro materiales.

**Palabras clave:** adsorción, lirio acuático, cadmio, hidrocarbonizado, ácido cítrico

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adnan, J., Arfan, M., Shahid, T., Khan, M. Z., Masab, R., Ramish, A. H., Ahtasham, S., Wattoo, A., Hashim, M., Zahoor, A., Nasir, M. F. (2019). Synthesis of cadmium hydroxide nanostructure via composite-hydroxide-mediated approach. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 9, 1847980419852551, 1-7.
- Ahmad, I., Siddiqui, W. A., Qadir, S., Ahmad, T. (2018). Synthesis and characterization of molecular imprinted nanomaterials for the removal of heavy metals from water. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 270-282.
- Arellano, O., Flores, M., Guerra, J., Hidalgo, A., Rojas, D., Strubinger, A. (2016). Hydrothermal carbonization (HTC) of corncob and characterization of the obtained hydrochar. *Chemical Engineering Transactions*, 50, 1-6.
- Auge, M. (2007). Agua Fuente de Vida. *Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires*.
- Azzaz, A. A., Khiari, B., Jellali, S., Ghimbeu, C. M., Jeguirim, M. (2020). Hydrochars production, characterization and application for wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109882, 1-24
- Baes, C. J., Mesmer, R. E. (1967) *The Hydrolysis of Cations*. 2nd Ed., Krieger Publishing, U.S.A.
- Baimenov, A., Berillo, D. A., Pouloupoulos, S. G., Inglezakis., V. J. (2020). A review of cryogels synthesis, characterization and applications on the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 276, 102088, 1-74.
- Barceló Coll, J., Rodrigo, G. N., Sabater García, B., Sancjhez Tamés, R. (2019). *Fisiología Vegetal*. 4a. Ed., Ediciones Pirámide, España
- Barrett, E. P., Joyner, L. G., Halenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373-380.
- Benkli, Y. E., Can, M. F., Turan, M. U. S. T. A. F. A., Celik, M. S. (2005). Modification of organo-zeolite surface for the removal of reactive azo dyes in fixed-bed reactors. *Water Research*, 39(2-3), 487-493.

- Bertin, G., Averbek, D. (2006). Cadmium: cellular effects, modifications of biomolecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review). *Biochimie*, 88(11), 1549-1559.
- Bohem, H.P. (1994). Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon*, 32(5), 759-76
- Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319.
- Buasri, A., Chaiyut, N., Tapang, K., Jaroensin, S., Panphrom, S. (2012). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using water hyacinth as a low cost biosorbent. *Civil and Environmental Research*, 2(2), 17-24.
- Burakov, A. E., Galunin, E. V., Burakova, I. V., Kucherova, A. E., Agarwal, S., Tkachev, A. G., Gupta, V. K. (2018). Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 702-712.
- Cárdenas-Aguiar, E., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Méndez, A. (2019). Thermogravimetric analysis and carbon stability of chars produced from slow pyrolysis and hydrothermal carbonization of manure waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 434-443.
- Center, T. D., Dray Jr, F. A., Jubinsky, G. P., Grodowitz, M. J. (1999). Biological control of water hyacinth under conditions of maintenance management: can herbicides and insects be integrated. *Environmental Management*, 23(2), 241-256.
- Choi, H. J., Yu, S. W., Kim, K. H. (2016). Efficient use of Mg-modified zeolite in the treatment of aqueous solution contaminated with heavy metal toxic ions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63, 482-489.
- Chuquilín Goicochea, R. C., Rosales Laguna, D. D. (2016). Estudio de la biosorción de Cd (II) Y Pb (II) usando como adsorbente *Nostoc sphaericum* Vaucher. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(1), 49-60.
- Cooney, D. O. (1998). *Adsorption Design for Wastewater Treatment*. CRC Press LLC, Florida, USA.



- Cuoco, E., Darrah, T. H., Buono, G., Eymold, W. K., Tedesco, D. (2015). Differentiating natural and anthropogenic impacts on water quality in a hydrothermal coastal aquifer (Mondragone Plain, Southern Italy). *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 7115-7134.
- Deng, L., Geng, M., Zhu, D., Zhou, W., Langdon, A., Wu, H., Yu, Y., Zhu, Z., Wang, Y. (2012). Effect of chemical and biological degumming on the adsorption of heavy metal by cellulose xanthogenates prepared from *Eichhornia crassipes*. *Bioresource technology*, 107, 41-45.
- Deng, S., Wang, P., Zhang, G., Dou, Y. (2016). Polyacrylonitrile-based fiber modified with thiosemicarbazide by microwave irradiation and its adsorption behavior for Cd (II) and Pb (II). *Journal of Hazardous Materials*, 307, 64-72.
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, Y., Zheng, B., Cai, X. (2016). Competitive removal of Cd (II) and Pb (II) by biochars produced from water hyacinths: performance and mechanism. *RSC advances*, 6(7), 5223-5232.
- Duong D, Do (1998). *Adsorption analysis: Equilibria and kinetics (with cd containing computer MATLAB programs)*, 2nd Ed., Imperial College Press, London.
- Elaiqwu, S. E., Rocher, V., Kyriakou, G., Greenway, G. M. (2014). Removal of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> from aqueous solution using chars from pyrolysis and microwave-assisted hydrothermal carbonization of *Prosopis africana* shell. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 3467-3473.
- Emam, A. A., Faraha, S. A. A., Kamal, F. H., Gamal, A. M., Basseem, M. (2020). Modification and characterization of Nano cellulose crystalline from *Eichhornia crassipes* using citric acid: An adsorption study. *Carbohydrate Polymers*, 240, 116202, 1-11.
- Fernandez, M. E., Ledesma, B., Román, S., Bonelli, P. R., Cukierman, A. L. (2015). Development and characterization of activated hydrochars from orange peels as potential adsorbents for emerging organic contaminants. *Bioresource technology*, 183, 221-228.

- Gao, Y., Wang, X., Wang, J., Li, X., Cheng, J., Yang, H., Chen, H. (2013). Effect of residence time on chemical and structural properties of hydrochar obtained by hydrothermal carbonization of water hyacinth. *Energy*, 58, 376-383.
- Gao, P., Zhou, Y., Meng, F., Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, W., Xue, G. (2016). Preparation and characterization of hydrochar from waste eucalyptus bark by hydrothermal carbonization. *Energy*, 97, 238-245.
- Gaurav, G. K., Mehmood, T., Cheng, L., Klemeš, J. J., Shrivastava, D. K. (2020). Water hyacinth as a biomass: a review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122214, 1-62.
- Goswami, R., Shim, J., Deka, S., Kumari, D., Kataki, R., Kumar, M. (2016). Characterization of cadmium removal from aqueous solution by biochar produced from *Ipomoea fistulosa* at different pyrolytic temperatures. *Ecological Engineering*, 97, 444-451.
- Greenwood, N. N., Earnshaw, A. (2012). *Chemistry of the Elements*. 2nd Ed., Elsevier, London
- Gunnarsson, C. C., Petersen C. M. (2007). Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review. *Waste management*, 27(1), 117-129.
- Gupta, P., Roy, S., Mahindrakar, A. B. (2012). Treatment of water using water hyacinth, water lettuce and vetiver grass—a review. *Resources and Environment*, 2(5), 202-215.
- Gurvich, L. G. (1915). Physico-chemical force of attraction. *Journal Physical, Chemistry. Society of Russia*, 47, 805-827.
- Jian, X., Zhuang, X., Li, B., Xu, X., Wei, Z., Song, Y., Jiang, E. (2018). Comparison of characterization and adsorption of biochars produced from hydrothermal carbonization and pyrolysis. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 27-35.
- Han, L., Sun, H., Ro, K. S., Sun, K., Libra, J. A., Xing, B. (2017). Removal of antimony (III) and cadmium (II) from aqueous solution using animal manure-derived hydrochars and pyrochars. *Bioresource Technology*, 234, 77-85.

- Hasan, S. H., Talat, M., Rai, S. (2007). Sorption of cadmium and zinc from aqueous solutions by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bioresource Technology*, 98(4), 918-928.
- Ingole, N. W., Bhole, A. G. (2003). Removal of heavy metals from aqueous solution by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 52(2), 119-128.
- Khorzughy, S. H., Eslamkish, T., Ardejani, F. D., Heydartaemeh, M. R. (2015). Cadmium removal from aqueous solutions by pumice and nano-pumice. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(1), 88-96.
- Lavado Meza, C., Sun Kou, M. D. R., Bendezú, S. (2010). Adsorción de plomo de efluentes industriales usando carbones activados con  $H_3PO_4$ . *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(2), 165-178.
- Leyva-Ramos, R., Bernal-Jacome, L. A., Acosta-Rodriguez, I. (2005). Adsorption of cadmium (II) from aqueous solution on natural and oxidized corncob. *Separation and Purification Technology*, 45(1), 41-49.
- Leyva-Ramos, R. (2007). Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida: Sólidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones. Ediciones Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Leyva-Ramos, R. (2010). Fundamentos de adsorción en sistemas líquido-sólido. IBEROARSEN, Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas, CYTED, Argentina, 3, 43-50.
- Leyva, R., Flores, J. V., Díaz, P. E., Berber, M. S. (2008). Adsorción de Cromo (VI) en solución acuosa sobre fibra de carbón activado. *Información tecnológica*, 19(5), 27-36.
- Leyva-Ramos, R., Jacobo-Azuara, A., Martínez-Costa, J. I. (2021). Organoclays. Fundamentals and Applications for Removing Toxic Pollutants from Water Solution. *Porous Materials: Theory and Its Application for Environmental Remediation*, 341-363, Springer Nature, Switzerland.

- Li, F., He, X., Srishti, A., Song, S., Tan, H. T. W., Sweeney, D. J., Ghosh, S., Wang, C. H. (2021). Water hyacinth for energy and environmental applications: A review. *Bioresource Technology*, 327, 124809, 1-14.
- Li, X., Liu, S., Na, Z., Lu, D., Liu, Z. (2013). Adsorption, concentration, and recovery of aqueous heavy metal ions with the root powder of *Eichhornia crassipes*. *Ecological Engineering*, 60, 160-166.
- Lima, E. C. (2018). Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 1-17.
- Lima, J. R. A., De Farias, D. L., Menezes, T. H. S., Oliveira, R. V. M., Silva, I. A. A., da Costa Cunha, G., Romão, L. P. C. (2020). Potential of a magnetic hybrid material produced using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for removal of inorganic and organic pollutants from aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104100, 1-31.
- Lippens, B. C., De Boer, J. H. (1965). Studies on pore systems in catalysts: V. The t method. *Journal of Catalysis*, 4(3), 319-323.
- Liu, C., Ye, J., Lin, Y., Wu, J., Price, G. W., Burton, D., Wang, Y. (2020). Removal of Cadmium (II) using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) biochar alginate beads in aqueous solutions. *Environmental Pollution*, 264, 114785, 1-9.
- Liu, Z., Wang, Z., Chen, H., Cai, T., Liu, Z. (2020). Hydrochar and pyrochar for sorption of pollutants in wastewater and exhaust gas: a critical review. *Environmental Pollution*, 268, 115910, 1-19.
- Lokeshwari, H., Chandrappa, G. T. (2006). Heavy Metals Content in Water, Water Hyacinth and Sediments of Lalbagh Tank, Bangalore(India). *Journal of Environmental Science & Engineering*, 48(3), 183-188.
- Mahamadi, C. (2011). Water hyacinth as a biosorbent: A review. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(13), 1137-1145.
- Mahmood, T., Malik, S. A., Hussain, S. T. (2010). Biosorption and recovery of heavy metals from aqueous solutions by *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) ash. *BioResources*, 5(2), 1244-1256.

- Malik, A. (2007). Environmental challenge vis. a vis. opportunity: the case of water hyacinth. *Environment international*, 33(1), 122-138.
- Mesmer, R. E., Baes, C. F. (1976). The hydrolysis of cations. Ed. Wiley, EUA.
- Ming, D. W. y Dixon, J. B. (1987). Quantitative determination of clinoptilolite in soils by a cation-exchange capacity method. *Clays Clay Miner.*, 35, 463–468.
- Miró, O. B. (2008). *Diseño de catalizadores para una obtención limpia de 2-feniletanol*. Universitat Rovira i Virgili.
- Mitra, T., Singha, B., Bar, N., Das, S. K. (2014). Removal of Pb (II) ions from aqueous solution using water hyacinth root by fixed-bed column and ANN modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 273, 94-103.
- Moore, D. M. Reynolds, R. C. (1997). X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Edition: 2. Oxford ; New York: OUP USA.
- Muramoto, S., Oki, Y. (1983). Removal of some heavy metals from polluted water by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 30(1), 170-177.
- Neris, J. B., Luzardo, F. H. M., da Silva, E. G. P., Velasco, F. G. (2019). Evaluation of adsorption processes of metal ions in multi-element aqueous systems by lignocellulosic adsorbents applying different isotherms: a critical review. *Chemical Engineering Journal*, 357, 404-420.
- Nigam, J. N. (2002). Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose–fermenting yeast. *Journal of Biotechnology*, 97(2), 107-116.
- Padilla-Ortega, E., Leyva-Ramos, R., Flores-Cano, J. V. (2013). Binary adsorption of heavy metals from aqueous solution onto natural clays. *Chemical Engineering Journal*, 225, 535-546.
- Park, D., Yun, Y. S., Park, J. M. (2010). The past, present, and future trends of biosorption. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 15(1), 86-102.
- Pignatello, J. J. (1998). Soil organic matter as a nanoporous sorbent of organic pollutants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 76, 445-467.

- PN, A. M. L., Madhu, G. (2011). Removal of heavy metals from wastewater using water hyacinth. *International Journal on Transportation and Urban Development*, 1(1), 48-52.
- Priya, E. S., Selvan, P. S. (2017). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)—An efficient and economic adsorbent for textile effluent treatment—A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3548-S3558, 1-11.
- Pulicharla, R., Hegde, K., Brar, S. K., Surampalli, R. Y. (2017). Tetracyclines metal complexation: Significance and fate of mutual existence in the environment. *Environmental Pollution*, 221, 1-14.
- Qian, H., Wang, J., Yan, L. (2020). Synthesis of lignin-poly (N-methylaniline)-reduced graphene oxide hydrogel for organic dye and lead ions removal. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 204-210.
- Ramirez, A., Pérez, S., Flórez, E., Acelas, N. (2021). Utilization of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) rejects as phosphate-rich fertilizer. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 104776, 1-8.
- Rao, K. S., Mohapatra, M., Anand, S., Venkateswarlu, P. (2010). Review on cadmium removal from aqueous solutions. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(7) 81-103.
- Rezania, S., Din, M. F. M., Mohamad, S. E., Sohaili, J., Taib, S. M., Yusof, M. B. M., Kamyab, H., Darajeh, N., Ahsan, A. (2017). Review on pretreatment methods and ethanol production from cellulosic water hyacinth. *BioResources*, 12(1), 2108-2124.
- Rezania, S., Ponraj, M., Talaiekhosani, A., Mohamad, S. E., Din, M. F. M., Taib, S. M., Sabbagh, F., Sairan, F. M. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of environmental management*, 163, 125-133.
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., Sing, K. S. (2013). *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*. 2nd Edition, Academic press, U.S.A.

- Salazar-Rábago, J. J., Leyva-Ramos, R. (2016). Novel biosorbent with high adsorption capacity prepared by chemical modification of white pine (*Pinus durangensis*) sawdust. Adsorption of Pb (II) from aqueous solutions. *Journal of environmental management*, 169, 303-312.
- Saraswat, S., Rai, J. P. N. (2010). Heavy metal adsorption from aqueous solution using *Eichhornia crassipes* dead biomass. *International journal of mineral processing*, 94(3-4), 203-206.
- Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., Bhoumik, N. C. (2017). Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder. *Water resources and industry*, 17, 1-6.
- Saufi, H., Alouani, M. E., Aride, J., Taibi, M. H. (2020). Rhodamine B biosorption from aqueous solution using *Eichhornia crassipes* powders: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Data Collections*, 25, 100330, 1-14.
- Sennou, A. S., Xiu, S., Shahbazi, A. (2020). Comparative Evaluation of Hydrochars and Pyrochars for Phosphate Adsorption from Wastewater. In *Applications of Biochar for Environmental Safety* (p. 71). IntechOpen.
- Singh, J., Kalamdhad, A. S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresource technology*, 124, 169-179.
- Sharma, A., Aggarwal, N. K. (2020). Water Hyacinth: An Environmental Concern or a Sustainable Lignocellulosic Substrate. In *Water Hyacinth: A Potential Lignocellulosic Biomass for Bioethanol* (pp. 11-19). Springer, Cham.
- Sharma, R., Jasrotia, K., Singh, N., Ghosh, P., Sharma, N. R., Singh, J., Kanwar, R., Kumar, A. (2020). A comprehensive review on hydrothermal carbonization of biomass and its applications. *Chemistry Africa*, 3(1), 1-19.
- Smolyakov, B. S. (2012). Uptake of Zn, Cu, Pb, and Cd by water hyacinth in the initial stage of water system remediation. *Applied geochemistry*, 27(6), 1214-1219.
- Soltan, M. E., Rashed, M. N. (2003). Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. *Advances in environmental research*, 7(2), 321-334.

- Song, L., Zhang, S., Wu, X., Wang, Z., Wei, Q. (2012). Self-assemble, growth mechanism, and optical properties of complex and oriented 3D CdCO<sub>3</sub> pyramids consist of single crystal parallel tetrahedrons. *Chemical engineering journal*, 195, 15-21.
- Sooknah, R. (2000). A review of the mechanisms of pollutant removal in water hyacinth systems. *University of Mauritius Research Journal*, 6, 49-57.
- Sun, K., Shi, Y., Wang, X., Li, Z. (2017). Sorption and retention of diclofenac on zeolite in the presence of cationic surfactant. *Journal of hazardous materials*, 323, 584-592.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., Sutton, D. J (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology*, 133-164.
- Thommes, M., Cychosz, K. A. (2014). Physical adsorption characterization of nanoporous materials: progress and challenges. *Adsorption*, 20(2-3), 233-250.
- Ulfa, S. M., Chamidah, N., Kurniawan, A. (2019, February). Adsorption of Cu (II) in Aqueous Solution by Modified Sawdust Cellulose. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 239, 012008, 1-7.
- Vanavanichkul, T., Le, G. T., Lawagon, C. P., Sano, N., Viriya-empikul, N., Faungnawakij, K., Charinpanitkul, T. (2021). Step-by-step conversion of water hyacinth waste to carbon nanohorns by a combination of hydrothermal treatment, carbonization and arc in water processes. *Diamond and Related Materials*, 111, 108222, 1-40.
- Wilson, J. R., Holst, N., Rees, M. (2005). Determinants and patterns of population growth in water hyacinth. *Aquatic Botany*, 81(1), 51-67.
- Wu, S., Zhang, K., Wang, X., Jia, Y., Sun, B., Luo, T., Meng, F., Jin, Z., Lin, D., Shen, W., Kong, L., Liu, J. (2015). Enhanced adsorption of cadmium ions by 3D sulfonated reduced graphene oxide. *Chemical Engineering Journal*, 262, 1292-1302.
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M., Zimmerman, A. R., Ro, K. S. (2012). Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: batch and column tests. *Chemical Engineering Journal*, 200, 673-680.



- Yan, S. H., Song, W., Guo, J. Y. (2017). Advances in management and utilization of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in aquatic ecosystems—a review. *Critical reviews in biotechnology*, 37(2), 218-228.
- Yu, J., Tang, T., Cheng, F., Huang, D., Martin, J. L., Brewer, C. E., Grimm, R. L., Zhou, M. Luo, H. (2021). Waste-to-wealth application of wastewater treatment algae-derived hydrochar for Pb (II) adsorption. *MethodsX*, 8, 101263, 1-14.
- Zambianchi, M., Durso, M., Liscio, A., Treossi, E., Bettini, C., Capobianco, M. L., Melucci, M., Aluigi, A., Kovtun, A., Ruani, G., Corticelli, F., Brucale, M., Palermo, V., Navacchia, M. L. (2017). Graphene oxide doped polysulfone membrane adsorbents for the removal of organic contaminants from water. *Chemical Engineering Journal*, 326, 130-140.
- Zheng, J. C., Feng, H. M., Lam, M. H. W., Lam, P. K. S., Ding, Y. W., Yu, H. Q. (2009). Removal of Cu (II) in aqueous media by biosorption using water hyacinth roots as a biosorbent material. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 780-785.
- Zheng, J. C., Liu, H. Q., Feng, H. M., Li, W. W., Lam, M. H. W., Lam, P. K. S., Yu, H. Q. (2016). Competitive sorption of heavy metals by water hyacinth roots. *Environmental pollution*, 219, 837-845.
- Zhou, R., Zhang, M., Li, J., Zhao, W. (2020). Optimization of preparation conditions for biochar derived from water hyacinth by using response surface methodology (RSM) and its application in Pb<sup>2+</sup> removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104198.