

Análisis de la factibilidad de la biomasa proveniente de *Eichhornia Crassipes* para la remoción de mercurio: caso de estudio fibras y perlitas lignocelulósicas

Feasibility analysis of biomass from *Eichhornia Crassipes* for mercury removal: case study of lignocellulosic fibers and perlites.

María Yoselín Muñoz Medina¹, Alma Hortensia Serafin Muñoz^{1*}, Hugo López Alvarado¹, Mayela Janeth Zavala Sánchez¹, Ulises Emiliano Rodríguez Castrejón¹, José Ignacio Ceseña Quiñonez¹.

¹Departamento de ingeniería civil y ambiental, ingeniería ambiental, campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

*sermuah@ugto.mx, my.munozmedina@ugto.mx

1. Resumen

En el presente trabajo se llevó a cabo la experimentación para determinar la eficiencia del material lignocelulósico proveniente del lirio acuático (*Eichhornia Crassipes*) para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio. Se elaboraron perlas de biomasa empleando alginato como agente gelificante y se prepararon fibras de biomasa con lavado para realizar el comparativo de remoción entre ambas presentaciones, para evaluar la remoción se prepararon soluciones de mercurio en concentraciones de 0.01 0.02 y 0.03 ppm que se pusieron en contacto con la biomasa por tiempos de 1, 2 y 4hrs, posteriormente se analizaron las concentraciones de las soluciones por absorción atómica.

Palabras clave: Biomasa; metales pesados, mercurio, alginato, adsorción, absorción atómica, material lignocelulósico.

2. Introducción.

Actualmente se tiene una seria problemática por la contaminación de metales pesados tanto en aire, suelo y agua a nivel mundial. Los metales pesados pueden clasificarse según sus efectos biológicos, los primeros son los esenciales, estos son metales que son necesarios para que los seres vivos lleven a cabo sus funciones metabólicas. Los segundos son los metales tóxicos los cuales tienen efectos nocivos en la salud, aunque se encuentren en bajas concentraciones. Por último, están los metales que no son necesarios para los seres vivos, pero se desconocen efectos nocivos para la salud. (Pineda et al, 2015). Estos metales se encuentran en el agua tanto por fuentes naturales como fuentes antropogénicas, siendo estas últimas las responsables del incremento de las concentraciones de metales pesados a niveles nocivos para la salud y el medio ambiente. Las actividades económicas que más impactan en la contaminación por metales pesados son la minería, curtiduría, fundición y refinación de metales, quema de combustibles fósiles, madera y carbón, refinación de aceites, uso de fertilizantes, la industria química, producción de vidrio, etc. El principal motivo de esta contaminación son procesos productivos poco eficientes y una mala gestión de residuos que genera vertidos tóxicos en cuerpos de agua, así como emisiones a la atmósfera que se asientan al paso del tiempo. (Pineda et al, 2015) (Covarrubias et al, 2017). La contaminación por metales pesados compromete la salud alimentaria a causa del riego de cultivos alimenticios con aguas contaminadas y el uso de esta misma para consumo humano en regiones donde no se cuenta con acceso a agua potable. (Reyes et al, 2016). La problemática en México ha ido en aumento principalmente por la minería, por lo que las zonas más afectadas son las regiones donde la minería toma parte importante de la economía, entre ellos el estado de Guanajuato, siendo los metales más comunes el mercurio, plomo, arsénico y cromo. (Covarrubias et al, 2017). La contaminación por mercurio se obtiene principalmente en el proceso de fundición del oro y por la descomposición de las amalgamas que al ser lavadas generan aguas residuales que son vertidas en los cuerpos de agua, principalmente en los procesos artesanales, también es utilizado en la agricultura en compuestos orgánicos. El mercurio es un metal que genera mucho conflicto ya que es persistente en el medio ambiente y es altamente tóxico para los seres vivos siendo el metilmercurio y el fenilmercurio los más dañinos debido a su alta biodisposición que les permite incorporarse a la cadena

alimenticia. Su principal efecto a la salud es neurotóxico, entre los efectos por su exposición se encuentra la debilidad muscular, falta de coordinación, pérdida de la visión periférica, insomnio, trastornos mentales y en niños y bebés se puede observar afectaciones en el pensamiento cognitivo, memoria, etc. (Dominguez et al, 2016) (Environmental Protection Agency,n.d) (Yarto et al, n.d)

La alternativa para la remoción de metales pesados de los cuerpos de agua es la fitorremediación, estas técnicas representan la ventaja de ser más amigables con el medio ambiente, además ser de los pocos métodos que permiten una reducción eficiente de los metales siendo capaces de tratar grandes volúmenes de agua. Entre las plantas más empleadas para la fitorremediación en cuerpos de agua se encuentra el lirio acuático, esta planta ha demostrado una alta capacidad para remover metales pesados, además de ser de crecimiento rápido, crece extendiéndose por toda la superficie hasta cubrirla por completo, volviéndola una planta factible para procesos de fitorremediación. (Barrera et al, 2020) (Galván, 2006) (Morales, 2021).

Actualmente en el estado de Guanajuato se tiene la problemática de cuerpos de agua contaminados por metales pesados y a pesar de esto existen grupos vulnerables que emplean el agua de estas presas y ríos para uso personal debido a la escasez de agua, por lo que se busca implementar un sistema de tratamiento de agua a partir de biomasa de lirio acuático que fue obtenido previamente de la presa de Yuriria. Para manipular la biomasa de manera más práctica y eficiente se trabajará con biomasa en dos presentaciones, la primera en fibras y la segunda será biomasa encapsulada en perlas de alginato. El alginato es un polisacárido soluble en agua extraído de las algas marinas pardas, está compuesto por ácido alginico unido a sodio, potasio, calcio o magnesio, siendo estos los que influyen en su viscosidad. Tiene propiedades gelificantes (se da en presencia de iones de calcio), espesante, estabilizador y formador de películas, lo que lo vuelve muy versátil y empleado en industrias como la farmacéutica y la alimentaria. La viscosidad de la solución está directamente relacionada con la longitud de las cadenas del polímero, entre mayor sea la longitud, mayor será la viscosidad. La viscosidad del alginato aumenta al hidratarse y la presencia de una solución ácida favorece la formación de un gel de alta viscosidad. (Contreras, 2019) (Avenidaño et al, 2013) Al no ser reactivo no afecta los procesos en los que es involucrado, por eso es empleado para encapsular materiales en polvo o de tamaños difíciles de manipular como es el caso de la biomasa de lirio molida.

El presente trabajo tiene como propósito investigar una alternativa innovadora para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados enfocándose específicamente en la remoción de mercurio por medio de perlas de material lignocelulósico proveniente del lirio acuático.



Figura 1. Lirio acuático. Tomado de REFORMA, junio 27, 2013

3. Metodología.

Preparación de la biomasa. El proceso comienza con la limpieza del lirio acuático, para ello se enjuagan las fibras en repetidas ocasiones para retirar tierra y otras suciedades, posteriormente se deja reposar por 24 horas en una solución de peróxido de hidrógeno al 20 %. Transcurrido el tiempo de reposo, realizar 4 enjuagues con agua destilada para retirar la solución de peróxido de la biomasa y finalmente secar por 48 horas aproximadamente a 50 °C. La biomasa seca debe ser procesada en un triturador y tamizada con malla del número 20. Una parte de las fibras de biomasa fueron preparadas en perlas de alginato y otra parte se conservó en presentación de fibras. Para emplear las fibras en pruebas de absorción se lleva a cabo un nuevo lavado empleando el equipo soxhlet colocando un cartucho con 3 g de biomasa, al tratarse de un lavado sencillo se usa agua desionizada como solvente. Concluidos tres ciclos se detiene el lavado y se deja enfriar a temperatura ambiente, después, las fibras son secadas por completo en una estufa.

Perlas de alginato. Se comienza con la preparación de la solución de alginato, para ello se miden 100 ml de agua destilada y se lleva a la parrilla de agitación empleando un rango de temperatura entre 60 y 80°C y se agrega gradualmente 2.5 g de alginato de sodio. Una vez disuelto el alginato se agrega biomasa de lirio en una relación de 0.05 g de biomasa por ml de solución de alginato y se homogeniza con agitación. Para la formación de las perlas se debe preparar una solución de cloruro de calcio al 0.5 molar. La técnica consiste en dejar caer gota a gota la solución de alginato con biomasa en la solución de cloruro de calcio y al contacto la gota se solidifica, transcurrido un tiempo son retiradas de la solución y secadas a temperatura ambiente.

Caracterización de las perlas. Pesar individualmente 20 muestras representativas de las perlas para obtener el peso tanto seco como húmedo, además se debe medir el diámetro de 10 perlas de alginato empleando un vernier digital, posteriormente se obtienen los datos estadísticos. Para conocer la densidad de las perlas se emplea una probeta de 10 ml y de coloca un volumen de agua conocido, posteriormente se agrega un número de perlas conocido, así como su peso en conjunto para determinar la densidad por medio el principio de Arquímedes. Finalmente se llevó a cabo la estructura de las perlas en el microscopio estereoscópico Axiocam 208 color ZEISS por medio del software Blue ZEISS a aumentos que van de 0.8X a 4X.

Remisión de mercurio a partir de material lignocelulósico. A partir de una solución estándar de 1000 ppm de mercurio se prepara un nuevo estándar de 10 ppm, para ello se necesita preparar una solución de HCl al 0.2% que es empleado como disolvente, posteriormente se realizan diluciones para concentraciones de 0.01, 0.02 y 0.03 ppm usando como disolvente HCl al 1.5 %, los volúmenes del estándar de mercurio son manipulados con micropipetas en la campana de extracción empleando mascarilla, bata y guantes como equipo de protección.

Para las pruebas de contacto consisten en colocar biomasa en perlas o fibras con las soluciones de mercurio en tubos falcón de 15 ml por tiempos de 1, 2 y 4 Hrs en el RotaMix a la velocidad de 50 rpm para las tres concentraciones de mercurio. Se pesa la muestra de perla o fibras y se colocan 13 ml de solución, en el caso de la prueba con fibras se pesan aproximadamente 0.0150 g para cada tubo y se emplea el mismo volumen de solución, el proceso se realizó por duplicado. Finalmente se preparan los blancos (solución sin biomasa) y los controles (biomasa en agua destilada), estos funcionan como prueba mecánica para evaluar la resistencia de las perlas de alginato ante la agitación constante. Una vez cumplido el tiempo de contacto se detiene la rotación y se lleva a cabo el filtrado por gravedad para separar la biomasa de la solución.

Antes de la determinación de la concentración de las muestras de mercurio es necesario preparar una curva de calibración que relacione la concentración y la absorbancia, para ello se prepara por triplicado soluciones de mercurio a concentraciones de 0.01, 0.02, 0.03 y 0.05 ppm, estas soluciones son leídas por el equipo de absorción atómica, brindando valores de absorbancia que son empleados para realizar una gráfica cuya ecuación de la recta permite despejar x de la ecuación, x representa la concentración de mercurio en la muestra. Finalmente se leen las muestras de la prueba de contacto en el equipo de absorción atómica PinAAcle 900F de la marca Perkin Elmer con la técnica de vapor frío propuesta por la casa comercial. Dicha técnica consiste en estabilizar las muestras adicionando una gota de solución de permanganato de potasio al 5% a cada tubo con muestra de mercurio, posteriormente la muestra puede ser analizada. El análisis consta de tres etapas; en la primera etapa es la generación de Hg^0 volátil en la que generalmente se añade a las muestras borohidruro de sodio que actúa como reductor pasando el Hg^{+2} de la muestra a Hg^0 , en la segunda etapa el vapor metálico es arrastrado por argón (gas inerte) hasta una celda de cuarzo donde se lleva a cabo la tercera etapa en la cual se emite radiación que es absorbida por los átomos en estado fundamental (Hg^0), algunos metales necesitan calor para alcanzar este estado pero en el caso del mercurio no es necesario, siendo la principal diferencia entre la técnica de vapor frío y la generación de hidruros.



1. Preparar soluciones de ClCa y alginato



2. Elaborar las perlas de alginato



3. Secar a temperatura ambiente y contar.



4. Caracterización física



8. Preparar soluciones de mercurio



7. Pesar muestras de biomasa.



6. Secar en estufa



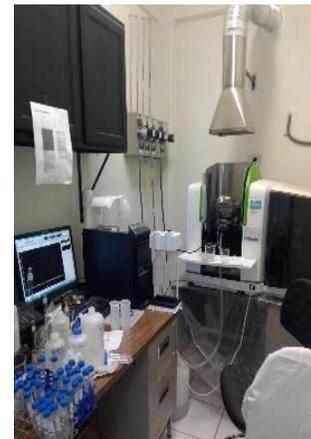
5. Lavado de fibras con soxhlet.



9. Prueba de contacto.



10. Estabilización de muestras



11. Lectura de muestras en equipo de absorción atómica.

4. Resultados y discusiones.

Características del material obtenido

Se consiguió un aproximado de 670 perlas por cada 100 ml de solución de alginato con material lignocelulósico, las perlas tienen un diámetro de $2.976\text{mm} \pm 0.716506959$, un peso de $0.015165\text{g} \pm 0.007785024$ y la prueba de densidad mostró un valor de 0.455566667 mg/ml . Las formas de las perlas fueron en su mayoría irregulares y presentaron una coloración café que se intensificó al secar, el cambio de apariencia al secarse resultó muy evidente, por lo que se calculó el porcentaje de humedad obteniendo el valor de 55% de humedad.

La prueba de resistencia mecánica fue positiva, tras varias horas en agitación constante a 50 rpm las perlas de alginato conservaron su estructura, se observó el desprendimiento de algunas hebras de biomasa, sin embargo, estas fueron mínimas y de tamaños casi imperceptibles.

Se realizó el análisis estadístico de los datos obtenidos para los pesos de las perlas y los diámetros medidos que se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 1. Análisis estadístico para pesos de las perlas.

Columna1	
Media	0.015165
Error típico	0.001740784
Mediana	0.01185
Moda	0.0106
Desviación estándar	0.007785024
Varianza de la muestra	6.06066E-05
Curtosis	0.109569565
Coefficiente de asimetría	0.841826619
Rango	0.0299
Mínimo	0.0043
Máximo	0.0342
Suma	0.3033
Cuenta	20

Tabla 2. Análisis estadístico para los diámetros de las perlas.

Columna1	
Media	2.976
Error típico	0.226579395
Mediana	2.745
Moda	2.65
Desviación estándar	0.716506959
Varianza de la muestra	0.513382222
Curtosis	4.252077584
Coefficiente de asimetría	1.977829418
Rango	2.45
Mínimo	2.3
Máximo	4.75
Suma	29.76
Cuenta	10

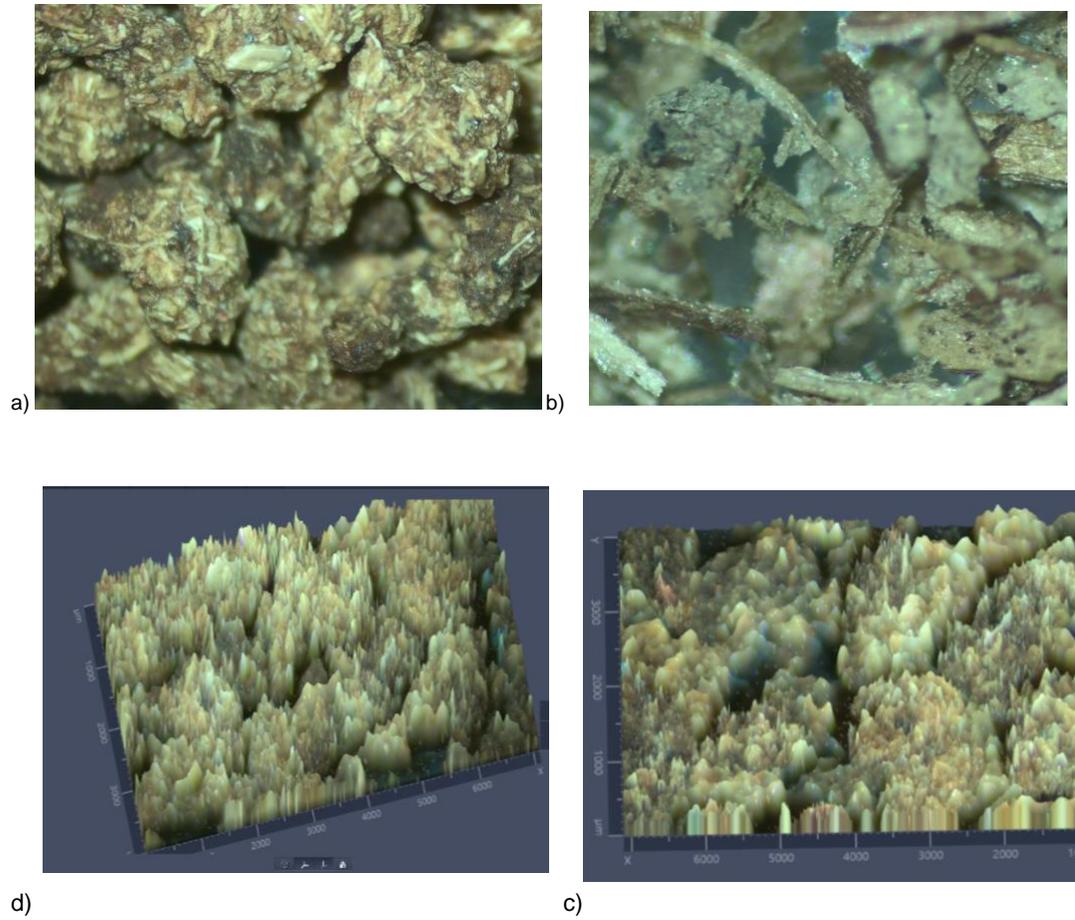


Figura 2. a) en la imagen se puede observar las formas irregulares de las perlas y la variación de colores a causa de las fibras. b) se aprecia las estructuras de las fibras sin alginato. c) y d) son imágenes en 3D de las perlas que permiten apreciar la rugosidad de la superficie.

Absorción atómica.

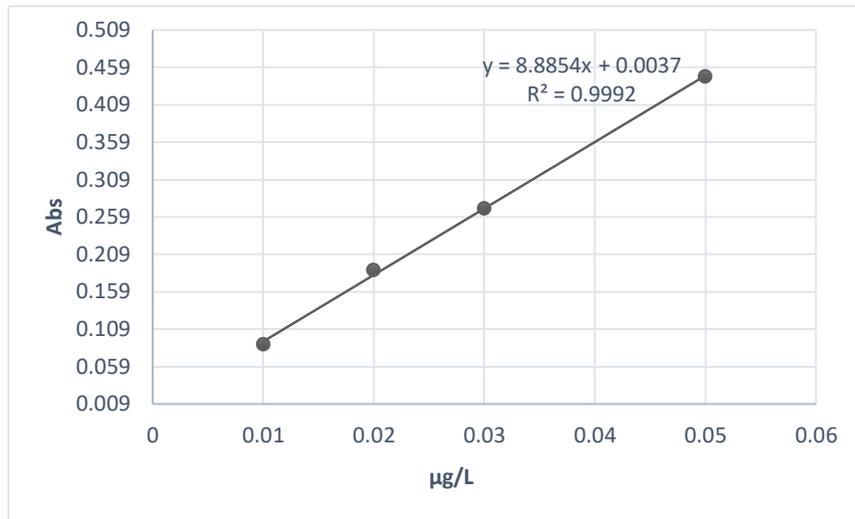


Figura 3. Curva de calibración para concentraciones de mercurio. Se utilizaron concentraciones de 0.01, 0.02, 0.03 y 0.05 µg/L. Empleando el equipo AAS-HG PinAAacle 900F Perkin Elmer. La ecuación de la recta obtenida es: $y = 8.8854x + 0.0037$ con un R^2 de 0.9992. Fuentes: Autor, 2023

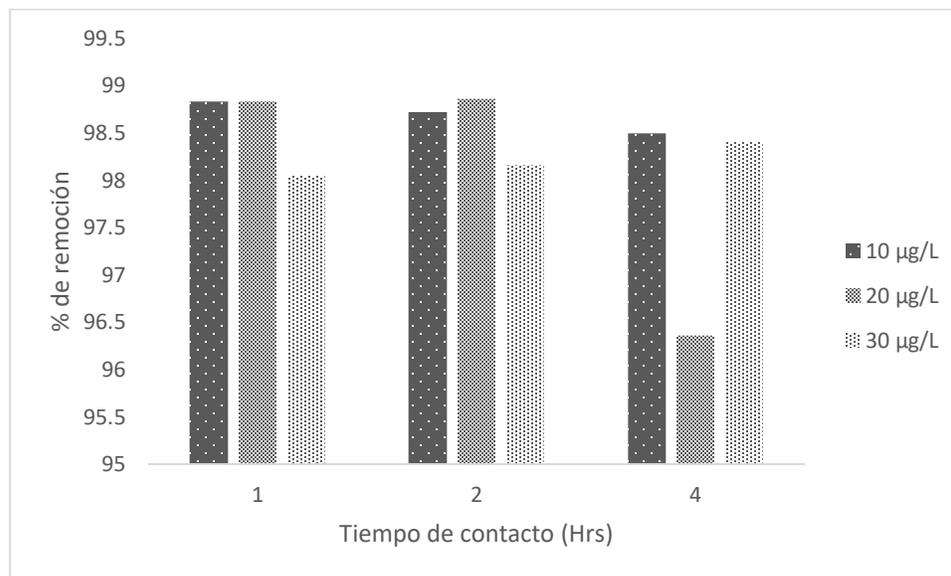


Figura 3. Gráfica del porcentaje de remoción según los tiempos de contacto en perlas.

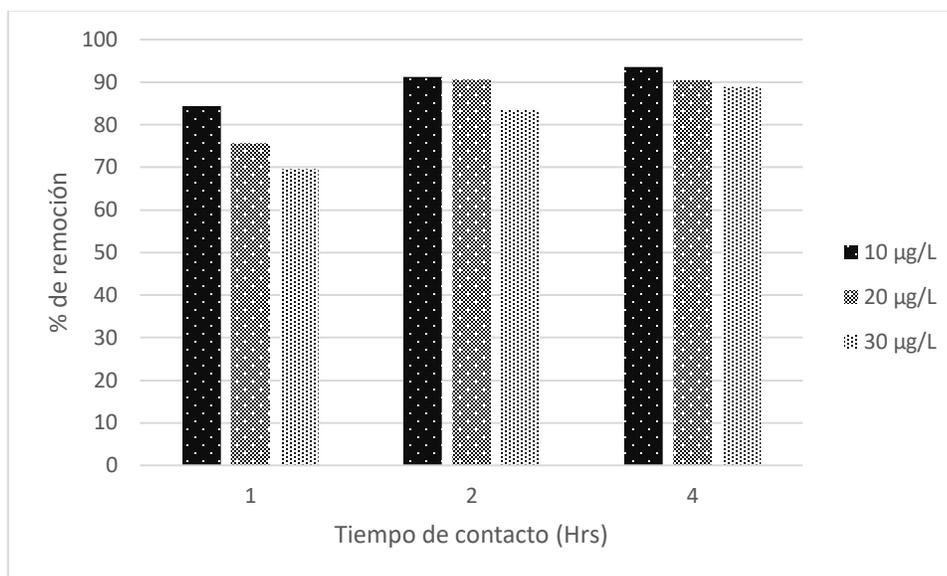


Figura 4. Grafica del porcentaje de remoción según el tiempo de contacto en fibras.

Según lo observado en las tablas y gráficos anteriores, la biomasa proveniente del lirio acuático es altamente eficiente en la remoción de mercurio, su eficiencia supera los porcentajes de remoción reportados en la bibliografía teniendo como valor más cercano el reportado por Fabre et al, 2021 quien obtuvo un % de remoción de 91.9% en soluciones de $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ tras un contacto de 72 hrs. Kedirvelu et al, 2004 elaboró carbón activado a partir de *Eichhornia Crassipes* (lirio acuático) obteniendo un % de remoción del 73%, mostrando que el lirio acuático es más eficiente como biomasa seca que como carbón.

Analizando los valores obtenidos con las variantes de tiempo de contacto, concentración y presentación de la biomasa se puede puntualizar que en el caso de las perlas se obtuvo el mayor % de remoción alcanzando hasta 98.8% para la concentración de 10 ppb ($\mu\text{g}/\text{L}$), aunque si bien, el porcentaje de remoción redujo con la concentración, la variación fue mínima. Al variar los tiempos de contacto no se observó una tendencia en los valores de la remoción pues las soluciones tuvieron comportamientos diferentes en los tiempos de contacto dependiendo de la concentración de mercurio inicial.

Las fibras presentaron una tendencia a reducir el porcentaje de remoción al aumentar el tiempo de contacto, esto se puede relacionar a que la superficie de las fibras puede verse saturada a medida que absorbe mercurio según lo observado por Tejada et al, 2021. Respecto las concentraciones se observa una tendencia a aumentar el % de remoción al aumentar la concentración de las soluciones.

Se observó una diferencia en el porcentaje de remoción entre ambos diseños del material lignocelulósico del 13 % perteneciendo el porcentaje más alto a la presentación en perlas. Esta diferencia entre ambas presentaciones del material lignocelulósico se puede atribuir a que la perla tiene mayor volumen que las fibras y por consecuencia una mayor área superficial para más adsorción. Otra ventaja de las perlas de alginato sobre las fibras está en la facilidad de manipulación que tienen las perlas, ya que el proceso de filtrado y recuperación de biomasa resulta más complejo al tratar de recolectar las fibras.

5. Conclusiones.

Los valores de remoción obtenidos tanto en presentación de perlas como para fibras son altos, por lo que puede ser considerado para futuros proyectos de remediación de aguas contaminadas por mercurio. Este trabajo contribuye como perspectiva futura para analizar el potencial del material lignocelulósico procedente del lirio acuático (*Eichhornia Crassipes*) en ambas presentaciones (fibras y perlas) para generar sistemas de

tratamiento de aguas contaminadas por mercurio en comunidades del municipio de Guanajuato y mejorar la calidad del agua de consumo doméstico de sus habitantes.

Agradecimientos.

Los autores agradecen el valioso apoyo del comité de verano de ciencia UG de la dirección de apoyo a la investigación y al posgrado de la universidad de Guanajuato; edición 2023.

6. Referencias

- Abraham Covarrubias, S., & Peña Cabriales, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de Fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(esp01), 7–21. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.esp01.01>
- Avendaño Romero, G. C., López, A., & Palou, E. (2013). Propiedades del Alginato y aplicaciones en alimentos. http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/acym/ALGINATOS_I.pdf
- Contreras, A. G. (2019, February). *Uso De biocompositos de Quitosano, Alginato y Biomasa de Aspergillus australiensis con aplicación potencial para bioeliminar cobre en aguas contaminadas de uso agrícola*. Universidad de Sonora. <https://investigadores.unison.mx/es/studentTheses/uso-de-biocompositos-de-quitosano-alginato-y-biomasa-de-aspergillus>
- Domínguez, M. C., S., S. G., & A, A. N. A. (2016, December 1). *Fitorremediación de Mercurio presente en Aguas Residuales Provenientes de la Industria Minera*. UGCiencia. <http://contexto.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/705/1075>
- Environmental Protection Agency. (n.d.). *Efectos en la salud por la exposición al mercurio*. EPA. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-en-la-salud-por-la-exposicion-al-mercurio>
- Fabre, E., Vale, C., Pereira, E., & Silva, C. M. (2021). Sustainable water treatment: Use of agricultural and industrial wastes to remove Mercury by Biosorption. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(7), 232–284. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05165-5>
- Galván Güemes, G. E. (2006, January 1). Comparación Entre dos Modelos Biológicos para la absorción de Cadmio y su posterior aplicación como fitorremediadores en Aguas Contaminadas. TESIUAQ: Página de inicio. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/7758>
- Kadirvelu, K., Kanmani, P., Senthilkumar, P., & Subburam, V. (2004, April). *Separation of mercury(ii) from aqueous solution by ...* - sage journals. SageJournals. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/0263617041503480>
- Miguel-Barrera, A., Castañeda-Antonio, D., Santamaría-Juárez, J. D., Munive-Hernández, J. A., Rivera-Tapia, A., & Ramos-Cassellis, M. E. (2020, March 16). *Modelo de Biorremediación de Plomo Con Lirio Acuático*. RIAA Principal. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/9398>
- Morales, A. F. G. (2021, June 1). *Uso De Lirios Acuáticos (eichornia crassipes) en un filtro modular para la extracción de cromo total en Aguas Residuales*. TESIUAQ: Página de inicio. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2946>
- Pineda, M. E., & Rodríguez, A. M. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): Su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para Su Remediación. *I3+*, 2(2), 82–112. <https://doi.org/10.24267/23462329.113>
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en Salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>
- Tejada tovar, C., Acevedo Correa, D., Paz, I., Espinoza Fortich, M., & López Badel, C. (2021). *Adsorption of chrome (VI) and mercury (II) in solution using hyacinth (Eichhornia crassipes)*. Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial., 1, 54–65. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(19\)54-65](https://doi.org/10.18684/BSAA(19)54-65)
- Yarto Rámirez, M., Gavilán García, A., & Castro Díaz, J. (n.d.). La Contaminación Por Mercurio en México - dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2882547.pdf>