

Uso de la cáscara de banano para la remoción de cobre (II) en soluciones acuosas

Use of banana peel for the removal of copper (II) in aqueous solutions

César Damian Zambrano Bazaruto¹, Segundo Alcides García Muentes¹
& Ramón Eudoro Cevallos Cedeño¹

¹Universidad Técnica de Manabí, Av. José María Urbina y Che Guevara, Portoviejo, Manabí

Recibido 01 agosto 2024, aceptado 11 octubre 2024, en línea 07 diciembre 2024

Resumen

En la actualidad, la presencia de metales pesados en el agua constituye una preocupación ambiental en potencia, debido a los efectos perjudiciales que pueden tener en la salud humana por el nivel de toxicidad que poseen. La materia prima para la obtención del bioadsorbente fue cáscara de banano (*Musa paradisiaca*); se aplicaron las operaciones unitarias, las mismas que consistieron en: limpieza, secado, molienda y una caracterización al bioadsorbente obtenido. Se realizó la determinación de los espectros FT-IR, un análisis bromatológico y organoléptico: lignina, hemicelulosa, color, olor y un análisis físico químico que comprendió: humedad y cenizas según lo estipulado por la norma ASTM D5630-13 Y ASTM D-4607. El desarrollo de los ensayos de adsorción se llevó a cabo a través de ensayos en sistema discontinuo, utilizando cuatro muestras, una concentración inicial de 0,93 mg/L, un pH de 5,4, y cuatro tiempos de contacto (45 min, 60 min, 120 min y 240 min), teniendo el mayor porcentaje de remoción en la M3 a los 120 min de 90,33%. En conclusión, se disminuyó el porcentaje de Cu (II) presente en las disoluciones con sulfato de Cobre (II) pentahidratado utilizando cáscara de banano como bioadsorbente y sobre todo se demostró que los desechos agrícolas como cáscaras de banano pueden servir en la mitigación de aguas contaminadas y aprovechamiento de desechos.

Palabras Clave: Remoción, bioadsorción, metales pesados, contaminación.

Abstract

Currently, the presence of heavy metals in water constitutes a potential environmental concern, due to the harmful effects they can have on human health due to the level of toxicity they have. The raw material to obtain the bioadsorbent was banana peel (*Musa paradisiaca*); The unit operations were applied, which consisted of: cleaning, drying, grinding and a characterization of the bioadsorbent obtained. The determination of the FT-IR spectra, a bromatological and organoleptic analysis were carried out: lignin, hemicellulose, color, odor and a physical-chemical analysis that included: humidity and ash as stipulated by the ASTM D5630-13 and ASTM D-4607 standards. . The development of the adsorption tests was carried out through batch system tests, using four samples, an initial concentration of 0.93 mg/L, a pH of 5.4, and four contact times (45 min, 60 min, 120 min and 240 min), having the highest removal percentage in the M3 at 120 min of 90.33%. In conclusion, the percentage of Cu (II) present in the solutions with Copper (II) sulfate pentahydrate was reduced using banana peel as a bioadsorbent and, above all, it was demonstrated that agricultural waste such as banana peels can serve in water mitigation. contaminated and use of waste.

Keywords: Removal, bioadsorption, heavy metals, contamination

Introducción

El agua, es un elemento esencial en la vida humana, además de su interconexión en diferentes áreas, como: la salud, los alimentos, la energía y la economía (Reyes, y otros 2006). Del agua que dispone

el planeta, apenas un 0.025% es considerada apta para el consumo humano y los ecosistemas; sin embargo, sus fuentes sufren las consecuencias de la contaminación atribuida principalmente a actividades antropogénicas (CNA 2012). Según la Organización

* Correspondencia del autor:
E-mail: goroe40@gmail.com



Esta obra está bajo una licencia de creative commons: atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Los autores mantienen los derechos sobre los artículos y por tanto son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra.

de las Naciones Unidas (ONU s.f.), la presencia de componentes químicos o de otra naturaleza en una densidad superior a la situación natural, como los microorganismos, los metales pesados o los sedimentos, degradan la calidad del agua.

La presencia de metales pesados en el agua constituye un significativo problema ambiental, ya que puede generar efectos tóxicos perjudiciales para la salud humana (Verdugo 2017). Por lo general, los metales pesados no son eliminados de los ecosistemas acuáticos a través de procesos naturales, ya que no son biodegradables (Pabón, y otros 2020).

En la actualidad, existen numerosas clases de contaminantes de origen antrópico; entre los más comunes se encuentran el plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn). Estos, son componentes tóxicos que se acumulan en el organismo de los seres vivos por medio de inhalación, al alimentarse y al consumir agua (Londoño, Londoño y Muñoz 2016). El cobre, tiene una enorme aplicación en la industria y por el manejo inadecuado de los desechos residuales, concentraciones de este metal se depositan en fuentes de agua. Esto se debe a que las paredes celulares de estas biomásas contienen proteínas, lípidos y polisacáridos, que presentan una variedad de grupos funcionales. Entre estos grupos se encuentran los amino, carboxilo, fosfato, hidroxilo, sulfato y tiol (Fernandez, y otros 2020).

Una alternativa para tratar aguas contaminadas por metales pesados es la bioadsorción, por medio de biomateriales como cáscara de frutas, y que a su vez contribuyen en el reciclado de los mismos, ya que, muchas veces terminan como desechos que se queman o acumulan (Bustamante y Salazar Villaruel 2023). Esto se debe a que las paredes celulares de estas biomásas contienen proteínas, lípidos y polisacáridos, que presentan una variedad de grupos funcionales. Entre estos grupos se encuentran los amino, carboxilo, fosfato, hidroxilo, sulfato y tiol (Fernandez, y otros 2020).

La bioadsorción, es una tecnología que consiste en la captación de metales mediante una biomasa a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico. La utilización de residuos agrícolas disponibles se presenta como una opción viable para la remediación de metales pesados, dado que son considerados una fuente relevante para el proceso de adsorción (López y Lacayo 2020).

La industria bananera genera millones de toneladas de cáscaras como desecho, en nuestro medio; este residuo, no es aprovechado a plenitud. Varios autores han evidenciado que la cáscara de banano posee una alta capacidad bioadsorbente de metales pesados; su estructura química se encuentra formada principalmente por lignina. Su superficie está cargada negativamente debido a los grupos carbonilo e hidroxilo, los cuales favorecen la captación de metales pesados por el ya mencionado mecanismo de

adsorción (Bonilla, Calderón y Armijos 2015).

En este sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de la cáscara de banano para la remoción de cobre (II) en soluciones acuosas, proporcionando las condiciones adecuadas de operación que influyen en la bioadsorción, tales como: pH, dosis de biomasa, tiempo de contacto y la comprobación de la efectividad en el proceso de remoción.

Materiales y Métodos

La materia prima empleada para la obtención del bioadsorbente fue la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) suministrada por una chiflería local; la misma fue sometida a través de las siguientes etapas descritas en la (tabla 1) para su posterior caracterización y aplicación.

Preparación de la biomasa

Selección de la materia prima: Se seleccionó las cáscaras de banano que estuvieran en buen estado, para evitar su pronta degradación.

Limpieza: Se siguió la metodología expuesta por Arias (2019), donde se sumergieron las cáscaras de banano en una solución de NaClO (hipoclorito de sodio). Se realizaron lavados con agua destilada para la eliminación de posibles impurezas y compuestos solubles como resinas, taninos y agentes colorantes.

Secado: Las muestras fueron llevadas a la estufa (Helos heat, modelo H055N), a una temperatura de 105 °C durante 24 h.

Molienda: Se llevó las muestras al molino eléctrico modelo M-12, con un disco de abertura de 5,5 mm y una velocidad de rotación de 1700 rpm. El bioadsorbente obtenido correspondió a la fracción entre 0,300 mm - 0,420 mm y fue reservada en frascos color ámbar herméticamente cerrados.

Caracterización del bioadsorbente

Se realizó la determinación de los espectros FT-IR por medio del laboratorio de Química A-210 de la Universidad Central del Ecuador; un análisis bromatológico: lignina, hemicelulosa, un análisis organoléptico: color (método cualitativo), olor (método sensorial) y un análisis físico químico que comprendió: humedad (mediante el método de termobalanza marca BOECO, modelo BMA150) y cenizas (método de calcinación) según lo estipulado por la norma ASTM D5630-13 Y ASTM D-4607.

Preparación de solución estándar

Las disoluciones de Cu (II) se prepararon a partir de Sulfato de Cobre (II) pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) grado analítico Merck. Se preparó una solución estándar, la misma que se elaboró pesando 0,254 g Cu (II) en 1000 mL H_2O .

La ejecución de los experimentos de adsorción se llevó a cabo mediante procesos de sistema discontinuos a temperatura ambiente, para los cuales se utilizó

100 mL de solución para cada muestra a partir de la solución estándar a diferentes concentraciones. El sólido adsorbente se pesó e introdujo en un vaso de precipitación que previamente contenía la disolución de cobre a la concentración deseada. La solución se puso en contacto mediante agitación magnética a 1700 rpm durante un tiempo de 45 min, 60 min, 120 min y 240 min, correspondientes al tiempo de equilibrio.

El pH de las disoluciones se controló mediante la adición de HCl para garantizar un pH constante en todo momento con la utilización de un potenciómetro (Multifunction, modelo EZ-9902). Luego del tiempo de adsorción, se determinó la concentración final del metal presente en la fase líquida con la utilización de un checker hanna (modelo HI1702, copper HR).

Los ensayos se realizaron por triplicado. El porcentaje de remoción del metal por el bioadsorbente se determinó mediante la siguiente ecuación.

$$\% \text{ remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100$$

Donde C_o (mg L⁻¹) y C_f (mg L⁻¹) corresponden a la concentración inicial y final del ión metálico después de la adsorción respectivamente (Rodríguez, y otros 2016).

Análisis estadístico

Se utilizó como prueba paramétrica la ANOVA, además de un procedimiento para determinar la normalidad de los datos, mismos que son descritos a continuación: Para asegurar la validez de los análisis realizados, se

verificaron los supuestos de la normalidad de los datos previo a la aplicación de la ANOVA de dos factores, mediante la prueba de Shapiro-Wilk, esto debido al tamaño de muestra. La misma fue realizada en Statgraphics Centurion XVIII, teniendo como hipótesis nula: que los datos siguen una distribución normal, y como hipótesis alternativa que los datos no tienen una distribución normal.

Se aplicó una ANOVA de dos factores con varias muestras (4 muestras) por grupo (4 grupos), el software utilizado fue Statgraphics Centurion XVIII, los dos factores incidentes en el porcentaje de remoción evaluado fueron la cantidad de bioadsorbente y el tiempo de contacto. El pH y la concentración inicial de la disolución al ser valores fijos sin variación en todos los ensayos no fueron tomados en cuenta para este análisis.

Se omitió la aplicación de un análisis post hoc, debido a que este es útil cuando se usan más de dos factores, en este caso al ser dos la incidencia se pudo interpretar directamente sin necesidad de análisis adicionales.

Se aplicó una herramienta de estadística descriptiva para plantear de manera visual la comparación entre el porcentaje de remoción de las muestras vs tiempo, mediante un gráfico de barras, el software utilizado fue Microsoft Excel. En primera instancia se recolectaron los datos, se procesaron y posteriormente se seleccionó el gráfico de barras debido a su utilidad para comparar valores entre algunas categorías.

Tabla 1. Análisis fisicoquímicos, bromatológicos y organolépticos

Parámetros	Método	%	Reportado por otros autores (%)	Fuente
Contenido de cenizas	Calcinación	10,2	11,37	(Monsalve, Medina y Ruiz 2022)
Humedad	Termobalanza	85	89,1	
Lignina	ANKOM	14,20	-	-
Hemicelulosa	ANKOM	12,04	-	-
Color	Observación bajo luz natural	Verde intenso	-	-
Olor	Sensorial	Olor suave y aromático/frutal	-	-

Nota: En la tabla 1, se describen los resultados obtenidos respecto a la caracterización de la muestra de cáscara de plátano y su comparación con los resultados reportados por otros autores en donde se utilizó este modelo de estudio.

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente del trabajo de investigación analizando la cáscara de banano como bioadsorbente; los datos se muestran en las siguientes tablas y figuras:

En la Tabla 1, se presentan los análisis fisicoquímicos, bromatológicos y organolépticos de la cáscara de banano. Los parámetros evaluados incluyen el contenido de cenizas, humedad, lignina y hemicelulosa. El contenido de cenizas determinado por calcinación fue del 10,2%, valor que se compara con el 11,37% reportado por otros autores (Monsalve, Medina y Ruiz, 2022). La humedad medida por termobalanza resultó ser del 85%, ligeramente inferior al 89,1% encontrado en estudios previos. Los contenidos de lignina y hemicelulosa, determinados mediante el método ANKOM, fueron de 14,20% y 12,04%, respectivamente, aunque no se encontraron datos comparativos en la literatura revisada. Adicionalmente, se observó que la cáscara de banano presenta un color verde intenso, el mismo puede variar dependiendo del nivel de maduración que tenga la fruta. Una vez pulverizada, la cáscara toma un color marrón verdoso. De la misma manera el olor presente en la cáscara de banano fue suave y aromático frutal, característico de la etapa inicial de maduración en la que se utilizó.

El espectro FT-IR que se muestra en la figura 1 muestra la presencia de varios grupos funcionales en la cáscara de banano pulverizada, como grupos hidroxilo (O-H), carbonilo (C=O), y grupos aromáticos (C=C). Los grupos mencionados son conocidos por sus capacidades de interacción con una gran variedad de sustancias químicas a través de enlaces de hidrógeno e interacciones dipolo-dipolo, lo cual contribuye a mejorar la eficacia de la cáscara de banano como bioadsorbente.

Por lo tanto, la presencia y distribución de estos grupos funcionales en el espectro FT-IR confirman la capacidad de la cáscara de banano pulverizada para adsorber contaminantes como metales pesados.

Tabla 2. Resultados posteriores a la aplicación del bioadsorbente

Tiempo (min)	Porcentaje de remoción alcanzado (%)				Ci (mg/L)	pH	Color
	M1 (3g)	M2 (5 g)	M3 (10 g)	M4 (20 g)			
45	60,66	67,8	75,93	79,53	0,93	5,4	Ligeramente amarillo- marrón
60	54	78,06	80,66	82,66			
120	78,66	83,66	90,33	83,66			
240	74,33	79,33	83,66	88,33			

Nota: En la tabla 2, se describen los resultados correspondientes a la aplicación del bioadsorbente con respecto a las variables utilizadas que influyen en el proceso; pH, tiempo de contacto, cantidad del bioadsorbente, color de las muestras en contacto con el bioadsorbente, concentración inicial (Ci) y porcentaje de remoción alcanzado para cada muestra.

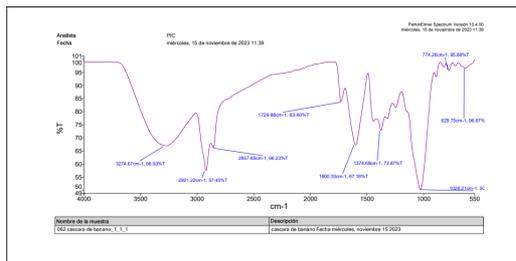


Figura 1. Porcentaje de remoción de Cu (II) con cáscara de banano (Musa paradisiaca) obtenido de cada muestra (g de bioadsorbente) vs el tiempo de contacto (min) para cada ensayo

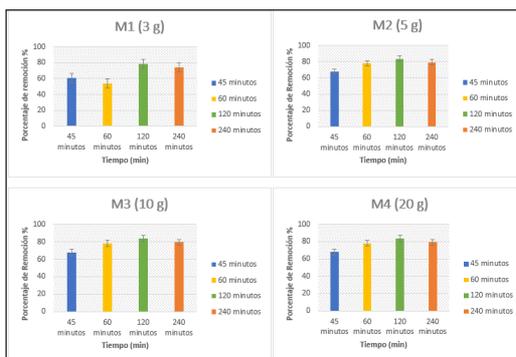


Figura 2. Espectro FT-IR de la cáscara de banano pulverizada, en donde %T (eje y) expresa el porcentaje de transmitancia y cm-1 (eje x) el número de onda

En la tabla 2, se aplicaron 4 tiempos para el ensayo de bioadsorción, con una dosis de biomasa (M1, M2, M3, M4) diferentes para cada tiempo expresadas en g, se proponen las medias del porcentaje de remoción obtenido para cada ensayo. Las soluciones tuvieron una concentración inicial de 0,93 mg/L de . y a su vez un pH constante de 5,4 en todos los ensayos, dichos valores fueron fijados en concordancia con lo aconsejable por bibliografía previamente consultada sobre investigaciones similares a esta.

Tabla 3. Análisis de Varianza de dos factores

ANOVA					
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad (Gl)	Promedio de los cuadrados	Probabilidad	Valor crítico para F
Cantidad de bioadsorbente	2102,21333	3	700,737778	1,9967E-13	2,901119584
Tiempo de contacto	1373,30667	3	457,768889	5,276E-11	2,901119584
Interacción	676,813333	9	75,2014815	2,6052E-05	2,188765768
Dentro del grupo	361,733333	32	11,3041667		
Total	4514,06667	47			

El color de la solución cambió ligeramente tras la adición del bioadsorbente, pasando de un tono ligeramente amarillento a un tono ligeramente marrón conforme se incrementaba la cantidad de bioadsorbente y el tiempo de contacto.

La prueba de normalidad previo a la ANOVA, nos sirvió para saber si los datos que íbamos a procesar cumplían con la normalidad establecida, se obtuvo un W: 0,97 y un P-valor de 0,11. Debido a que el valor de P es mayor a 0,05 la hipótesis nula no se rechaza, significando que los datos cumplen con una distribución normal, por lo que se consideró apropiado seguir con la elaboración de la ANOVA.

La tabla 3 ANOVA, descompone la varianza de los datos en 3 componentes: la cantidad de bioadsorbente, el tiempo de contacto y la interacción entre ellos. Además, el valor de la probabilidad de la prueba-F de cada uno de los componentes es relativamente muy inferior a 0.05% que es el nivel de significancia, el cual al ser comparados conlleva a la afirmación que existen diferencias significativas en el proceso.

En la figura 2 se muestra el porcentaje de remoción de Cu (II) con cáscara de banano para cada muestra en función del tiempo, se puede visualizar barras de error, mismas que exponen la confianza en las medidas de % de remoción. Se observa que a medida que aumenta la cantidad de bioadsorbente aplicado de la M1, M2, M3 y M4, el porcentaje de remoción inicial también aumenta. En todos los ensayos el porcentaje de remoción es exponencial con respecto al tiempo. Las muestras con mayor cantidad de bioadsorbente M3 y M4 indican resultados más persistentes con lo cual dichas condiciones podrían ser las más efectivas para la remoción de Cu (II) en tiempos más cortos comparadas con las muestras M1 y M2. La variabilidad presentada en las muestras M1 y M2 podría indicar que estas condiciones son más sensibles a cambios en el proceso o que existen otros factores no controlados que afectan la remoción en estos puntos. Lo planteado nos demuestra que, aunque el tiempo es un factor crucial, si el porcentaje de bioadsorbente no es controlado el ensayo no lograra una alta bioadsorción de Cu (II) en aguas contaminadas.

Discusión

El contenido de cenizas obtenido (tabla 1.), fue de 10,2%, el mismo que se consideró óptimo para la utilización del bioadsorbente; un valor elevado, sería contraproducente para el proceso de adsorción. Otros autores obtuvieron en su investigación un valor similar de 11,37% (Monsalve et al. 2022) utilizando también como biomasa cáscara de banano pulverizada.

En cuanto al porcentaje de humedad, se reportó un valor de 85%, el mismo que pese a ser un porcentaje alto no influyó en el rendimiento del bioadsorbente. Otros autores han reportado porcentajes de humedad mayor del 89,1% (Monsalve et al. 2022) esto se puede dar por muchos factores, el más recurrente es debido a la calidad de cáscaras de banano utilizadas; si estas tienen un índice de degradación considerable, la humedad será mayor, y, esto deriva en que la materia orgánica se degrade y el bioadsorbente tienda a ser contaminado con moho u otro tipo de microorganismo. El porcentaje de lignina obtenido fue de 14,20%, siendo este parámetro de suma importancia para el proceso de bioadsorción. En investigaciones vinculadas emplearon lignina como un adsorbente eficaz de metales pesados, así lo establecen autores que afirman que utilizar lignina o biomasa rica en este polímero deriva en un proceso de adsorción eficaz, debido a que esta contiene grupos funcionales que le confieren una gran capacidad de intercambio iónico (Crist, Crist y Martin 2018). Respecto al análisis de hemicelulosa se obtuvo un 12,04%. Citando a (Salman, Athar y Farooq 2015), dichos autores evidenciaron que, debido a su alta riqueza en grupos funcionales, los materiales lignocelulósicos se ofrecen como materias primas más eficaces en la eliminación de aguas contaminadas de metales pesados, como es el caso del planteado en esta investigación.

El análisis de los grupos funcionales presentes en la superficie de la cáscara de banano se determinó mediante FT-IR. En la figura 1, se puede observar que los picos muestran un incremento en la intensidad de las bandas a excepción del pico comprendido en los

enlaces carbono e hidrógeno que aparecen entre la región 1729,88 a 2857,65 cm^{-1} . El pico ancho obtenido en 3274,67 cm^{-1} corresponde a las vibraciones O-H, esto, producto del estiramiento de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos que se encuentran presentes en la pectina, celulosa y lignina, estableciendo hidroxilos libres, tal como lo menciona (Castro 2015). El pico alrededor de 2921,22 cm^{-1} ocurre en las vibraciones C-H de grupos metoxi, mientras que el pico observado en 1600,33 cm^{-1} hace referencia al estiramiento del enlace carbonilo (C=O), que puede ocurrir debido a las vibraciones de los grupos carboxilos presentes en la pectina y la lignina. Finalmente, los picos alrededor de 1028,21 cm^{-1} corresponden al estiramiento de enlaces C-O, correlacionado con lo expuesto por (Morón, 2018). En relación autores como afirman que la complejación de la superficie, la precipitación química y el intercambio iónico son responsables en la adsorción, éste último gracias a un gran número de grupos funcionales presentes como -OH, -CO, mismos que también se encuentran en un gran porcentaje en frutas como el coco (Fernandez, y otros 2020).

En cuanto a los ensayos de bioadsorción se obtuvo que en la M3 (10 g) se obtuvo el mayor porcentaje de remoción de Cu (II) en la matriz acuosa, teniendo un 90,33% en un tiempo de 120 min. Autores como Ahmad y Danish (2018), alcanzaron en su investigación una remoción del 98% con un tiempo de contacto de 60 minutos para su muestra utilizando una cantidad de bioadsorbente de 15 g aproximadamente. Esto nos rectifica que el porcentaje de remoción que obtuvimos fue óptimo utilizando menos biomasa y aplicando un mayor tiempo de contacto. Adicionalmente, en todas las muestras a partir de los 120 min el porcentaje de remoción no tenía un incremento significativo (Tabla 2); por tanto, se establece que a partir de este tiempo el adsorbente llegó a su pico tope de saturación con respecto a la concentración de la disolución.

Influencia del pH

Se trabajó con un pH de 5,4 para todas las muestras, debido a que existe evidencia científica que afirma que un rango de pH entre 3-5 favorece a un alto rendimiento en el proceso de bioadsorción. En relación a esto autores como Calero y otros (2011), en su investigación sobre adsorción de cobre (II) afirman que a partir de pH 5, la concentración de cobre en disolución comienza a disminuir debido a la precipitación del cobre en forma de CuO . A su vez los autores López y Lacayo (2020) evidenciaron en su investigación de remoción de Cromo hexavalente con cáscara de banano que al aumentar el pH se incrementa las concentraciones de los iones OH- induciendo cambios en la superficie de adsorbente, impidiendo la bioadsorción de los iones de cromo cargados negativamente, lo cual disminuye la adsorción del metal.

Influencia del tiempo de contacto y cantidad de bioadsorbente

La cantidad de adsorbente es uno de los factores que va a limitar hasta cierto punto la concentración

del metal que se adsorbe; dicho de otra manera, a mayor cantidad de adsorbente, teóricamente se debería tener una mayor adsorción (Vijayaraghavan y Balasubramanian 2015). En relación a lo expuesto, dichos autores afirman que la bioadsorción de metales pesados usualmente se completa en un intervalo de tiempo corto, logrando el equilibrio en pocas horas. Como se muestra en la Figura 2. El efecto de la dosis del adsorbente en los ensayos, muestra que la eliminación del cobre (II) fue alta con una dosis de 3 g de adsorbente y aumentó gradualmente con el aumento de la dosis a 20 g del bioadsorbente empleado. Es de saber científico que las cáscaras de frutas son ricas en pectinas, por lo que el mecanismo de bioadsorción de metales en pectinas procedentes de cítricos está condicionada principalmente por la cantidad de grupos de ácidos carboxílicos presentes, los mismos que reflejan una mayor cantidad de pectina cuando hay un bajo grado de metoxilación y una menor cantidad cuando el grado de metoxilación es alto (García Villegas, y otros 2011).

La tabla 3 muestra la prueba de significancia Anova con dos factores, estos fueron propuestos obviando el pH y la concentración inicial, ya que estos últimos eran valores fijos en los ensayos. Dichos factores presentan diferencias estadísticamente significativas entre sus medias, lo que propone que tienen una influencia relevante en el proceso de remoción de Cu (II). En la investigación de Ríos (2014) acerca de la cinética de arsénico utilizando cáscara de banano como bioadsorbente se determinó que no existió diferencia significativa ($p > 0,05$) entre los tratamientos estudiados: concentración de bioadsorbente y granulometría, sin embargo, dicho estudio no tomo como variable el tiempo de contacto, mismo que si tiene una influencia en el % de remoción de metales como el Cu (II).

Conclusión

Se disminuyó el porcentaje de Cu (II) presente en las disoluciones con sulfato de Cobre (II) pentahidratado utilizando cáscara de banano como bioadsorbente teniendo una concentración inicial de 0,93 ppm. Los ensayos de bioadsorción mostraron que tanto el tiempo de contacto como la cantidad de bioadsorbente son factores críticos que influyen significativamente en la eficiencia y eficacia del proceso. Se observó una alta capacidad de remoción del contaminante, alcanzando hasta el 90,33% de eliminación de Cu (II) bajo las condiciones de 120 min, 10 g de bioadsorbente. La aplicación de ANOVA (Tabla 2) comprobó la significancia de las variables estudiadas con respecto a su influencia en la remoción del metal.

Es importante realizar futuros estudios analizando la cinética de adsorción con cáscaras de diferente origen y que a su vez tengan un alto porcentaje de material lignocelulósico, esto aplicado a otro tipo de metales pesados que actualmente son una problemática ambiental. La bioadsorción utilizando residuos

agrícolas como es la cáscara de banano no solo brinda una solución eficiente, sino que también contribuye a que estos desechos puedan tener otro uso que no sea la basura. Este enfoque podría tener aplicaciones prácticas en la mitigación de aguas contaminadas por metales pesados y difundir estrategias más sostenibles para el manejo de residuos agrícolas que no tienen más valor agregado.

Referencias Bibliográficas

- Ahmad, T, y M Danish. «Prospects of banana waste utilization in wastewater.» A review. *Journal of Environmental Management*, n° 206 (2018): 330-348.
- Bonilla, Calderón, y Armijos. «Efecto de tres pre-tratamientos de cáscara de banano para la obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática.» *Avances en Química* 10, n° 1 (2015): 79-82.
- Bustamante, J, y S Salazar Villaroel. «Evaluación del efecto del tamaño de partícula y tiempo de contacto en la remoción de metales pesados plomo (pb) y mercurio (hg) presentes en aguas contaminadas utilizando cáscara de naranja (citrus sinensis) como adsorbente natural.» 2023.
- Calero, M, F Hernáninz, G Blázquez, E Dionisio, y M A Martín-Lara. «Evaluación de la bioadsorción de cobre con cáscara de almendra.» *Afinidad* 68 (2011): 554.
- Castro, B. «Uso de la cáscara de banano (Musa Paradisiaca) maduro deshidratada.» Tesis de Grado, 2015.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. «Estadísticas del Agua en México, 2011.» *Agua en el Mundo*, 2012.
- Crist, D, R Crist, y J Martin. «A new process for toxic metal uptake by a kraft lignin.» *Journal of chemical technology and biotechnology*, 2018: 199.
- Fernandez, M, y otros. «Remoción de metales pesados desde efluentes mineros, mediante cáscaras de frutas.» *Aibi Revista De investigación, administración E ingeniería* 1, n° 8 (2020): 21-28.
- García Villegas, V R, A G Yipmantin Ojeda, E G Guzmán Lezama, R Pumachagua Huertas, y H J Maldonado García. «Estudio de la cinética de biosorción de iones plomo reticulada proveniente de cáscaras de cítricos.» *Revista de la Sociedad Química del Perú* 77, n° 3 (2011): 173-181.
- Londoño, L., P. Londoño, y F. Muñoz. «Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal.» *SciELO XIV*, n° 2 (2016): 145-153.
- López, M, y M Lacayo. «Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (Musa paradisiaca) como adsorbente.» *Torreón Universitario VIII*, n° 23 (2020): 73-83.
- Monsalve, J, V Medina, y A Ruiz. «Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca.» 73, n° 150 (2022): 21-27.
- Morón, E. «La cáscara de plátano como adsorbente de metales pesados.» 2018.
- ONU. «Organización de las Naciones Unidas.» s.f.
- Pabón, S., R. Benítez, R. Sarria, y J. Gallo. «Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción.» *Una revisión, Entre Ciencia e Ingeniería XIV*, n° 27 (2020): 9-18.
- Reyes, Yulieth C, Omar Torres, Mercedes Díaz, y Edgar Gonzalez. «Heavy metals contamination: implications for health and food safety.» *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo XVI*, n° 2 (2006): 66-77.
- Ríos Elizalde, P. E. Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo. Bachelor's thesis, Machala: Universidad Técnica de Machala, 2014.
- Rodríguez, M, S Flores, M Rangel, y A Argotte. «Remoción de cobre (II) en sistemas acuosos usando cápsulas de moringa oleífera: influencia del pH.» *Acta Microscópica* 25, n° 1 (2016): 28-38.

- Salman, M, M Athar, y U Farooq. «Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials.» *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, n° 14 (2015): 211-228.
- Verdugo, J. «Bioadsorción de iones plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de mandarina (Citrus Reticulata var. Clementina).» Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- Vijayaraghavan, K, y R Balasubramanian. «Is biosorption suitable for decontamination of metal-bearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions.» *Journal of environmental management*, n° 160 (2015): 283-296.