

Remoción de Mercurio (II) en solución acuosa usando residuo industrial de yuca (Manihot esculenta)

Removal of Mercury (II) from aqueous solutions using cassava industrial waste (Manihot esculenta)

Alberto Ricardo Albis Arrieta¹, Sergio Andrés Arzuza Orellano², Adriana Margarita Mosquera Palacio³

¹Doctor en Ciencias Químicas. Universidad del Atlántico, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Bioprocesos, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia

²Ingeniero Químico. Universidad del Atlántico, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Bioprocesos, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia

³Ingeniero Químico. Universidad del Atlántico, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Bioprocesos, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia
Email: albertoalbis@uniatlantico.edu.co

Cite this article as: A. R. Albis Arrieta, S. A. Arzuza Orellano, A. M. Mosquera Palacio "Removal of Mercury (II) from aqueous solutions using cassava industrial waste (Manihot esculenta)", *Prospectiva*, Vol 17, N° 2, 33-39, 2019.

Recibido: 11/02/2019 / Aceptado: 20/06/2019

<http://dx.doi.org/10.15665/rp.v17i2.1951>

RESUMEN

Se estudió la remoción de mercurio (II) en solución acuosa usando residuo industrial de yuca teniendo en cuenta variables como el pH y la concentración inicial del metal. El material adsorbente fue pretratado y caracterizado. Se determinó que la cinética de adsorción se ajusta a un modelo de primer orden y que el tiempo para el equilibrio de remoción es de dos horas. La capacidad máxima de remoción que se obtuvo fue de 0.03 mmol/g a una concentración inicial de mercurio (II) de 400 mg/L y a un pH de 6. Adicionalmente, se obtuvo que la adsorción de este metal a pH de 4.75 y 6 se ajusta de manera adecuada al modelo de adsorción de Langmuir.

Palabras claves: Adsorción, Hg (II), Metales pesados, Residuo Industrial, Yuca.

ABSTRACT

Removal of Hg(II) from aqueous solutions using cassava industrial waste was studied varying pH and metal initial concentration. The adsorbent material was pretreated and characterized. The adsorption kinetic was adjusted to a first order model and the equilibrium time was 2 hours. The maximum adsorption achieved was 0.03 mmol/g at pH 6 and 400 mg/L of mercury (II) initial concentration. Also, the results obtained at pH 4.75 and 6 had a good fitting to Langmuir adsorption isotherm model.

Key words: Adsorption, Cassava, Hg (II), Heavy metals, Industrial Waste.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las fuentes hídricas con metales pesados es un problema mundial, debido a que este tipo de contaminantes se caracterizan por no ser ni biológica ni químicamente degradables y por tener una alta tendencia a ser bioacumulados en la cadena alimenticia [1]. Entre los metales pesados, el mercurio es considerado como uno de los más peligrosos [2]. En el ambiente, el mercurio es encontrado en su forma elemental y en varios compuestos orgánicos. Una de las especies más tóxicas es el dicloruro de mercurio

(HgCl₂), debido a que esta sustancia forma fácilmente complejos orgánicos de mercurio con proteínas [3]. Entre los métodos utilizados para remover metales pesados en las aguas se pueden encontrar la ósmosis inversa, filtración, coagulación, intercambio iónico y precipitación química, pero la gran desventaja de estos es que son costosos o complejos a nivel técnico [1].

La biosorción aprovecha la habilidad de algunos materiales biológicos de remover metales pesados que están en solución acuosa [4]. Este método resulta atractivo debido a que

la mayoría de los biosorbentes usados son de bajo costo y se presentan de manera abundante en la naturaleza o como producto de desecho de la industria agrícola. En los últimos años, se han realizado estudios con diferentes biomásas, entre las que se destacan el uso de residuos agrícolas como la cáscara de maní [5], cáscara de arroz [6], cáscara de pistacho [7], residuos de manzana [8], carbón activado obtenido de madera de pistacho [9] y algas [10], entre otros [11].

La yuca es uno de los cultivos más importantes del mundo y se ha identificado como un cultivo confiable, desde el punto de vista de la seguridad alimentaria. Varias de sus características favorables han ocasionado un incremento importante de la extensión cultivada con esta herbácea en las últimas décadas y la Organización de la Comida y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) predice que su cultivo se intensificará en el futuro [12]. Los principales productos industriales del cultivo de la yuca son el almidón y la harina. Durante el proceso de obtención estos dos productos se generan residuos sólidos tales como la cáscara y el bagazo [13], los cuales deben disponerse adecuadamente o darles algún valor agregado. El uso de residuos industriales de yuca (*Manihot Esculenta*) como biosorbente se ha estudiado anteriormente para la remoción de metales como el Pb (II), Cu (II), Cd (II) [14], Zn (II) [15], entre otros. En este artículo se estudió, a escala laboratorio, la remoción de Hg (II) usando el residuo industrial de yuca. Se determinaron la capacidad de remoción de mercurio (II), la influencia del pH y de la concentración de metal en la capacidad adsorbente del residuo agroindustrial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Reactivos

Para el desarrollo de esta investigación se usó ácido sulfúrico al 98% (H₂SO₄), dicloruro de mercurio (HgCl₂; Grado reactivo), ácido clorhídrico 0.1 N, hidróxido de sodio 0.1 N y bromuro de potasio (KBr; Grado reactivo).

2.2. Preparación del adsorbente

El residuo industrial de yuca (RIY) fue obtenido de una procesadora de harina de yuca local en el departamento de Sucre y fue sometido a tres procesos de lavado que consistieron en un tratamiento con agua suavizada, luego se colocó al sol durante 24 horas distribuidas en tres días dentro de una caja de vidrio perforada. Posteriormente, se puso en contacto con una solución de ácido sulfúrico a pH 3 con agitación continua durante una hora, se filtró y se lavó nuevamente con agua suavizada, repitiendo este proceso tres veces consecutivas. Al final, se secó el residuo a una temperatura de 105 °C durante un día, se molió y tamizó y, la fracción entre 90 y 150 mm, se almacenó en desecador, según las recomendaciones de la literatura [16].

2.3. Caracterización del adsorbente

2.3.1. pH del material

A 100 ml de agua destilada se le agregaron 2.22 gramos de residuo industrial tratado, se llevó esta mezcla hasta ebullición y se mantuvo en ese punto durante 2 minutos, luego se realizó la filtración de la solución y con los primeros 20 ml se enjuagó el vaso donde cayó el filtrado; por último, se filtró el resto de la mezcla y se realizó la medición del pH de la solución con el medidor electrónico de pH [17].

2.3.2. Determinación de lignina

Se tomaron 5 gramos del RIY y se sometieron a pretratamiento por 16 horas en un Soxhlet, usando acetona como solvente lixivante, posteriormente, el material se secó en horno a 105 °C por 24 horas. Posteriormente, se tomó aproximadamente 1 gramo del residuo pretratado, se agregó a 15 ml de una solución de ácido sulfúrico al 72% en volumen y se agitó por 2 horas a temperatura ambiente, luego se le agregó agua desionizada hasta reducir la concentración del ácido hasta un 3 % en peso y a continuación fue llevado a calentamiento hasta ebullición durante 4 horas. Finalmente, se dejó enfriar, se filtró y se lavó el residuo con agua caliente hasta obtener un pH neutro y se llevó a un secador, el peso final del material seco corresponde a la lignina que no se hidroliza con el ácido sulfúrico [18].

2.3.3. Análisis próximo y último

Se le realizó el análisis próximo y último a una muestra del RIY según la norma ASTM D 2234-00 con el objetivo de determinar el contenido de ceniza (Norma ASTM D3172- 89), la masa volátil (Norma ASTM D3175- 89), la humedad residual (Norma ASTM D3173- 87), el poder calorífico (Norma ASTM D2015-89), contenido de carbono e hidrógeno (Norma ASTM D3178, ISO 609 y UNE 32112), azufre (Norma ASTM D3177) y nitrógeno (Norma ASTM D3179) presente en el adsorbente.

2.4. Preparación de la solución stock

Se preparó una solución stock de HgCl₂ de 500 ml a concentración de 1000 mg/L, mediante la adición de 0.677 g de HgCl₂ en agua desionizada. Dicha concentración fue validada mediante el uso del espectrómetro de fluorescencia S2 PICOFOX, con resultado de 986 mg/L.

2.5. Estimación del tiempo de equilibrio

Se prepararon 95 ml de una solución de 250 mg/L, mediante la dilución respectiva de 23.3 ml de la solución stock. Se adicionó 1.00 g de yuca a la solución preparada y se sometió a agitación. Se tomaron muestras cada 10 minutos durante media hora, luego cada hora durante 6 horas y una última después de 24 horas de contacto.

2.6. Adsorción de Hg (II)

Se determinó la capacidad de remoción del material a pH 2, 4, 4.75, 6 y 8, con valores de concentración inicial del metal de 400, 190, 130, 100, 50 y 20 mg/L. El tiempo de contacto fue igual al determinado previamente y que corresponde al necesario para que se alcance el equilibrio de remoción.

Las muestras para los respectivos experimentos constaban de 95 ml de solución de mercurio, a los cuales se les agregó 1.00 g del adsorbente a temperatura de 25 °C con agitación constante, el pH fue ajustado usando ácido clorhídrico e hidróxido de sodio. La cantidad en milimoles de metal que es removido por gramo de biosorbente se conoce como capacidad de remoción (q) y se expresa como:

$$q = \frac{(C_o - C_f)}{m} \cdot V \quad (1)$$

Donde C_o es la concentración de inicial de mercurio en la solución en mmol/L, C_f es la concentración al final del contacto en mmol/L, m corresponde a la cantidad de biosorbente usado en gramos y V es el volumen de la muestra en litros.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de remoción el cual se expresa como:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \quad (2)$$

2.7. Determinación de la concentración de mercurio

Finalizado el experimento de contacto y remoción, a cada una de las muestras se le volvió a corregir el pH, llevándolo hasta un valor de 6, el cual es el pH idóneo para facilitar la acción quelante del EDTA sobre el mercurio [19]. Luego, se tomaron 10 ml de cada una y se sometieron a centrifugación a 4000 RPM por 5 minutos. Se tomó una alícuota de 1 ml de las muestras centrifugadas y se almacenaron en tubos eppendorf. Posteriormente se tomaron 100 μ l de los tubos, mezclándolos con 200 μ l de EDTA, agitando en un vortex por 1 minuto y dejando en reposo las muestras por 30 minutos. Luego, se extrajeron 50 μ l de las anteriores muestras y se mezclaron con 100 μ l de la solución estándar de galio a 10 mg/L, sometiendo a agitación con vortex por 1 minuto para luego depositarlas en portamuestras del equipo de fluorescencia. Para determinar la cantidad de iones de mercurio removidos por el adsorbente se usó el espectrómetro de fluorescencia de rayos X S2 PICOFOX (Bruker).

2.8. Análisis FTIR

La espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) fue implementada para la determinación de los grupos funcionales presentes en el residuo industrial de yuca antes y después de entrar en contacto con las soluciones de HgCl₂. Los espectros correspondientes fueron determinados con el

Espectrofotómetro FT-IR Shimadzu IR-Affinity en el rango de 400 a 7500 cm⁻¹, usando el método de las pastillas de KBr.

La preparación de las muestras consistió en la pulverización de muestras del residuo industrial que estuvo en contacto con soluciones de 0, 20, 100 y 400 mg/L de Hg. Al obtenerse un polvo fino, se tomaron 1 mg de cada muestra y se mezclaron con 50 mg de KBr para ser analizadas.

2.9 Isotermas de adsorción

En la adsorción los datos de equilibrio son vitales para entender los fundamentos de este proceso. En el área de la biosorción las ecuaciones de Freundlich y Langmuir son las más populares [20], la primera de estas es una ecuación empírica que representa la adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos en una amplia variedad de adsorbentes. Esta ecuación se expresa como:

$$q_e = k_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

La forma linealizada de la ecuación 3 es:

$$\log q = \log k_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (4)$$

Donde q_e es la capacidad de remoción (mmol/g), K_f es la capacidad de adsorción multicapa (mmol^(1-1/n)L/g), n es la constante de Freundlich y C_e es la concentración de la solución en el equilibrio (mmol/L).

Por otro lado la isoterma de adsorción de Langmuir está representada por:

$$q_e = \frac{Q \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (5)$$

La forma linealizada de la ecuación 5 se expresa como:

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{Q \cdot b} + \frac{C_e}{Q} \quad (6)$$

Donde los parámetros Q y b corresponden a la capacidad de adsorción en la monocapa (mmol/g) y la afinidad en la velocidad adsorbente-adsorbato (L/mg), respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del biosorbente.

3.1.1 Contenido de lignina

Los ensayos con el material biosorbente indican un pH promedio de 5.65. Adicionalmente, se obtuvo un 6.0 % de lignina por el método Klason en base seca en el residuo industrial. El valor de lignina obtenido es bajo si se compara con el valor presente en el tallo de yuca que se reporta en la literatura [21],

Tabla 1. Comparación de análisis próximo y último de ripio de yuca con residuo industrial de yuca.
Table 1. Comparison of ultimate and proximate analysis of cassava industrial waste with other parts of the plant.

Material	Análisis Próximo					Análisis Último				
	Humedad residual (%)	Ceniza Base seca (%)	MV (%)	CF (%)	PC (BTU/lb)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
RESIDUO (Este trabajo)	13.74	2.53	87.48	9.99	7403	43.21	6.01	ND	0.06	50.72
RIPIO [16]	12.87	3.51	77.24	19.25	7815	38.21	6.43	0.85	0.04	50.96
TALLO [16]	69.46	5.73	69.03	25.24	748	37.38	6.27	0.72	0.09	49.81

que corresponde a un 19% en peso en base seca. Esto puede deberse a que el residuo industrial de yuca es una combinación de la cáscara de yuca, almidón y tallos, lo cual podría reducir la cantidad de lignina presente en el adsorbente.

3.1.2 Análisis próximo y último

Los resultados correspondientes al análisis próximo y último se presentan en la Tabla 1, donde también se comparan los valores hallados en la caracterización del ripio y de los tallos de yuca de un estudio reciente [21]. Se observa que el material biosorbente presenta claras similitudes con el ripio de yuca, pues el análisis último indica valores muy cercanos para el contenido de hidrógeno, carbono y oxígeno, además en ambos es prácticamente inexistente el contenido de nitrógeno y azufre. Igualmente ocurre con el análisis próximo pues el poder calorífico del material, contenido de ceniza, material volátil y carbono fijo son similares al ripio.

3.1.3 Análisis FTIR

En la Figura 1 se muestra los espectros FTIR del RIY sin Hg y puesto en contacto con diferentes concentraciones de Hg. El estudio de cada uno de los espectros indica la presencia de distintos grupos funcionales, que pueden verse en la Tabla 2. Entre 3000 a 3650 cm^{-1} se forma una curva amplia cuyo pico corresponde a 3393 cm^{-1} que indica la presencia de grupos O-H [22], debido a la amplitud de la curva es probable que estos grupos se encuentren ya sea libres (3570-3670 cm^{-1}) o asociados intermolecularmente (3200-3600 cm^{-1}); se observa además que el pico máximo correspondiente a las muestras que fueron expuestas a la solución de mercurio se encuentra entre 3347 a 3348 cm^{-1} y para la muestra original del biosorbente este valor es 3393, este corrimiento en la longitud de onda del pico indica que los grupos OH interactúan con el mercurio en solución.

El pico entre 1050 a 1051 cm^{-1} para cada uno de los espectros indica grupos funcionales O-H relacionados con cadenas R-OH y fenoles. Los picos cercanos a 2900 cm^{-1} son producto de la deformación del enlace C-H alifático. A 1635 cm^{-1} se da un pico correspondiente a la presencia de enlaces C=O que conforman posiblemente ácidos carboxílicos, cetonas y aldehídos; el pico a 1015 cm^{-1} cae dentro de la banda corres-

pondiente a la vibración de enlaces C-O indicando grupos fenoles y ésteres. La presencia de estos grupos confirma la presencia de moléculas como la lignina y probablemente la de celulosa y hemicelulosa, las cuales son típicas en este tipo de material [23]. Los picos a 860 cm^{-1} validan la presencia de aromáticos debido a la vibración de anillos bencénicos.

Figura 1. Espectros FTIR del RIY antes y después de entrar en contacto con soluciones de 20, 100 y 400 mg/L de Hg (II).
Figure 1. FTIR spectra of Cassava industrial waste without Hg and after being in contact with solutions of 20, 100, and 400 mg/l of Hg (II).

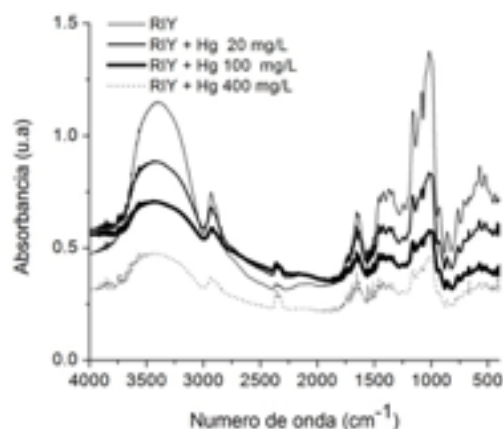


Tabla 2. Banda característica de diferentes grupos funcionales.
Table 2. FTIR Adsorption bands identified in cassava industrial waste.

Grupo Funcional	Banda característica (cm ⁻¹)	RIY	RIY + 20 mg/L Hg	RIY + 100 mg/L Hg	RIY + 400 mg/L Hg
Hidroxilo (O-H)	3400 – 3600	3393	3447	3448	3448
Grupos Alifáticos (C-H)	2900	2932	2924	2929	2930
Carboxilo (C=O)	1600 – 1650	1635	1635	1635	1635
Vibración del enlace (C-O)	950 – 1200	1015	1017	1016	1017
R-OH Primarios	1050	1051	1051	1050	1050
Anillos Bencénicos (850-900)	800-900	860	860	860	860

3.2 Determinación del tiempo de equilibrio

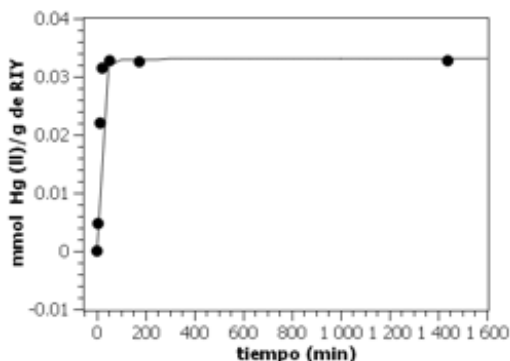
Los resultados obtenidos para este ensayo se ajustaron a un modelo cinético de primer orden reversible (Figura 2), obteniéndose que el tiempo de contacto mínimo debe ser igual

a 2 horas para que se alcance el equilibrio. La capacidad de remoción máxima a las condiciones del ensayo correspondió a 0.03 milimoles de Hg(II) por cada gramo de RIY.

$$q = 0.033 * (1 - e^{-0.066t}) \quad (7)$$

Figura 2. Cinética de adsorción de Hg (II) sobre RIY a pH 4.75, concentración inicial de 250 mg/L de Hg (II) con dosis de adsorbente de 1.0 % a 25°C.

Figure 2. Adsorption kinetics of Hg adsorption on Cassava industrial waste at pH 4.75, 25 °C, Hg initial concentration of 250 mg/L, and adsorbent dose of 1.0 % w/v.

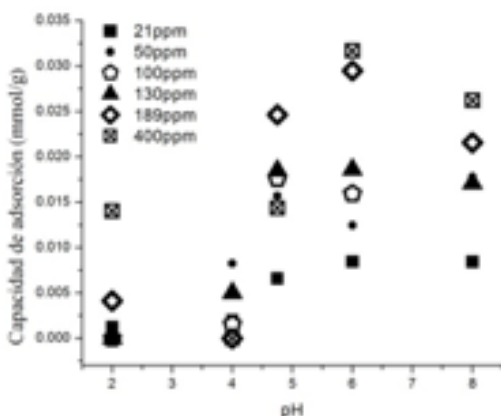


3.3 Efecto de la variación de concentración y pH

La mayor capacidad de remoción del metal se obtuvo entre el pH 4.75 y 6 (Figura 3). Para las concentraciones iniciales de 189 y 400 mg/L la capacidad de remoción fue de 0.031 y 0.029 mmol/g, respectivamente, a pH 6. Por otro lado, al utilizar una concentración inicial de 50 mg/L se obtuvo una máxima remoción igual a 0.015 mmol/g con pH natural. De igual forma, con una concentración de 100 mg/L la remoción obtenida fue de 0.017 mmol/g a pH natural. Para una concentración de 130 mg/L la mayor capacidad de remoción se logró fue a un pH de 6 con un valor igual a 0.018 mmol/g. En la solución de 21 mg/L de Hg la remoción resultó ser 0.008 mmol/g a un pH de 6.

Figura 3. Capacidad de adsorción (q) en función del pH de la solución a distintas concentraciones iniciales de mercurio (II).

Figure 3. Adsorption capacity (q) at several pHs and initial Hg (II) concentration.



También se puede observar que a valores bajos de pH, la capacidad de remoción decae considerablemente y esto puede deberse a la posible protonación que sufren los sitios activos del biosorbente, que según el análisis del FTIR deberían ser en su mayoría grupos hidroxilos; de modo que la adsorción del metal se ve impedida ya que estos iones deben competir con los protones presentes en el medio ácido.

A medida que el pH aumenta, la protonación de los sitios activos disminuye y la adsorción del metal se ve favorecida, sin embargo, cuando se alcanzan valores de pH superiores a 6 se empieza a formar Hg(OH)₂ el cual precipita [24], de modo que las remociones realizadas a pH 8 no corresponden únicamente al fenómeno de adsorción. En los experimentos realizados pH 6 y por debajo de este, coexisten tanto el HgCl₂ y el HgCl(OH) quienes no precipitan y garantizan que la remoción de mercurio correspondan sólo a la adsorción por parte del biosorbente y no a la precipitación de especies de mercurio.

Por otra parte, se comparó la capacidad de remoción máxima para el residuo industrial de yuca con algunos biosorbentes que se encuentran en la literatura y que han sido utilizados para la remoción de mercurio, la capacidad de remoción, pH óptimo y tiempo de equilibrio de estos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Comparación de la capacidad de remoción mercurio utilizando diferentes biosorbentes.
Table 3. Adsorption capacity of mercury using several biosorbents.

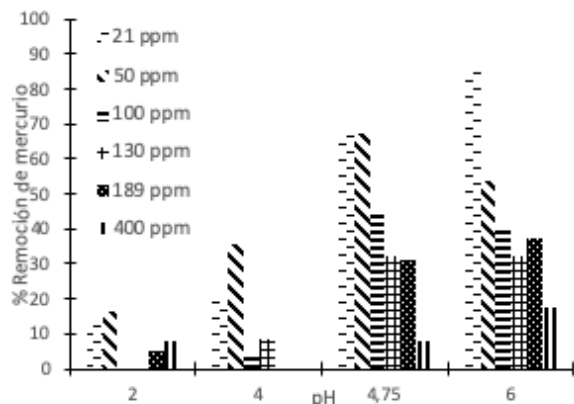
Biosorbente	Capacidad de adsorción (mmol/g)	pH Óptimo	Tiempo de Equilibrio (min)
Residuo Industrial de yuca	0.03	6	120
Espigas de arroz [24]	0.11	5	90
Corteza de Eucalipto [25]	0.17	8	40
Raicillas gastadas de malta [26]	0.25	5	60 - 240
Madera de papaya [3]	0.35	6.5	120
Carbón Activado de cáscara de nuez [27]	0.76	2	30 - 60

Es posible observar que el residuo industrial de yuca muestra una baja capacidad de remoción del mercurio (II) en comparación con otros adsorbentes estudiados y que el tiempo para el equilibrio de remoción es similar a materiales como la madera de papaya. Estos resultados pueden explicarse debido a la baja proporción de lignina encontrada en los RIY, la cual se ha reportado como uno de los componentes principales en la adsorción de cationes metálicos [28]. Los resultados de FTIR sugieren que la adsorción se da como producto de la interacción de grupos hidroxilos con el Hg, probablemente pertenecientes al componente celulósico del RIY, para el cual la capacidad de adsorción de cationes es menor que para la fracción de lignina.

Los porcentajes de remoción para la relación de 95 ml de solución del metal con 1 g del biosorbente para las distintas concentraciones iniciales y pH, fueron determinados y se presentan en la figura 4.

Figura 4. Porcentajes de remoción de mercurio a distintos pH y concentración inicial del metal, para una relación constante de 95 ml de solución de Hg (II) en contacto con 1 g de residuo industrial de yuca.

Figure 4. Removal percentage of mercury at several pH and mercury initial concentration using 95 ml of mercury solution and 1.0 g of biosorbent.



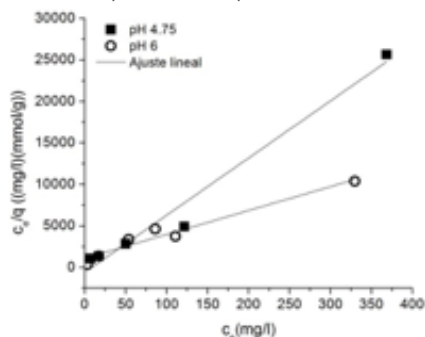
El mayor porcentaje de remoción estimado en 86.6% se obtuvo para la solución de 21 mg/L a pH 6; este resultado se explica debido a que probablemente la presencia de sitios activos en el material usado es mayor a la cantidad de iones Hg (II) presentes en la solución, lo que permite un alto porcentaje de remoción. Para concentraciones de 50, 100, 130 y 189 mg/L los porcentajes se reducen notoriamente hasta valores entre los 48 a 50%. Finalmente la solución de 400 mg/L fue la de menor porcentaje de remoción, debido a que la cantidad de adsorbente usado no logra compensar la cantidad de iones de Hg (II) presentes en los 95 ml de la solución.

3.4 Isotermas de adsorción

Los datos de adsorción obtenidos para pH 4.75 y 6 fueron graficados con el objetivo de determinar si se ajustaban a isotermas de adsorción de Langmuir (Fig. 5) o Freundlich (Fig. 6)

Figura 5. Isotermas de Langmuir para la adsorción de Hg sobre RIY a pH de 4.75 y 6.0.

Figure 5. Langmuir adsorption isotherms for Hg adsorption on RIY at pH 4.75 and 6.0.



Para ambos pH los datos son bien modelados por la isoterma de Langmuir, pues se obtienen valores de R^2 de 0.97 y 0.95 para el ajuste lineal. Los valores para los parámetros de Q y b se muestran en la tabla 4.

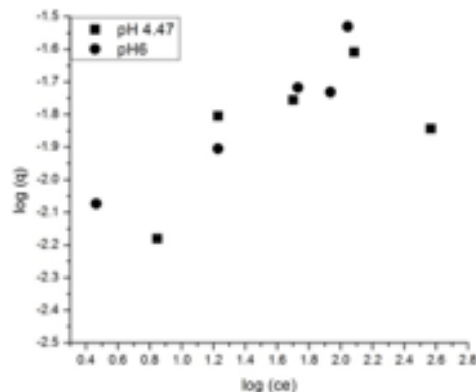
Tabla 4. Parámetros de los modelos de isotermas de adsorción de Hg con RIY a pH de 4.75 y 6.0.

Table 4. Isothermal adsorption parameters for Hg adsorption on RIY at pH 4.75 and 6.0.

pH	Constantes del modelo de Langmuir		Constantes del modelo de Freundlich	
	Q	b	K _f	n
4.75	1.4×10^{-2}	-8.6×10^{-2}	6.8×10^{-3}	4.9
6	3.5×10^{-2}	2.6×10^{-2}	5.8×10^{-3}	3.4

Figura 6. Isotermas de Freundlich para la adsorción de Hg sobre RIY a pH de 4.75 y 6.0.

Figure 6. Freundlich adsorption isotherms for Hg adsorption on RIY at pH 4.75 and 6.0.



El modelo de Freundlich para la adsorción de Hg sobre RIY a pH de 4.75 muestra una baja correlación lineal ($R^2=0.41$) del ajuste de los datos, mientras que para pH 6, el ajuste es mejor ($R^2=0.89$); sin embargo no supera los ajustes realizados para las isotermas de Langmuir, por ende este último tipo de isoterma es la que mejor describe el perfil de adsorción de mercurio con residuo industrial de yuca.

4. CONCLUSIONES

El residuo industrial de yuca se muestra como un potencial adsorbente para la remoción de mercurio (II) en solución acuosa, tanto por la presencia de grupos funcionales afines con los cationes de Hg, como por los porcentajes de remoción de hasta un 86.6% al usar un 1 g de yuca en 95 ml de solución con una concentración inicial del metal de 20 mg/L. Sin embargo, la máxima capacidad de adsorción que se obtuvo fue de 0.03 mmol/g, la cual es baja en comparación con otros biosorbentes reportados en la literatura. La baja capacidad de adsorción observada puede mejorarse modificando químicamente el adsorbente para aumentar la cantidad y fuerza de atracción de los

grupos funcionales que se constituyen sitios de adsorción de iones de Hg.

De igual forma, se determinó que el desempeño del adsorbente para remover los iones de mercurio depende del pH, donde la remoción resultó ser favorable para los valores de pH iguales a 4.75 y 6. Así mismo, se estableció que el tiempo de contacto para el equilibrio de remoción es de 2 horas y al ajustar los datos a los dos modelos de adsorción mencionados, se determinó que la isoterma de Langmuir es la que mejor describe el fenómeno de adsorción de mercurio con el residuo industrial de yuca.

REFERENCIAS

- [1] A. Abdolali, W. Guo, H. H. Ngo, S.-S. Chen, N. C. Nguyen, and K. L. Tung, "Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: a critical review", *Biore-source technology*, 160, 57-66, 2014.
- [2] E. Khoramzadeh, B. Nasernejad, and R. Halladj, "Mercury biosorption from aqueous solutions by sugarcane bagasse", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44 (2), 266-269, 2013.
- [3] S. Basha, Z. Murthy, and B. Jha, "Sorption of Hg (II) onto Carica papaya: experimental studies and design of batch sorber", *Chemical engineering journal*, 147 (2-3), 226-234, 2009.
- [4] A. Esmaili, B. Saremnia, and M. Kalantari, "Removal of mercury (II) from aqueous solutions by biosorption on the biomass of *Sargassum glaucescens* and *Gracilaria corticata*", *Arabian Journal of Chemistry*, 8 (4), 506-511, 2015.
- [5] S. Ricordel, S. Taha, I. Cisse, and G. Dorange, "Heavy metals removal by adsorption onto peanut husks carbon: characterization, kinetic study and modeling", *Separation and purification technology*, 24 (3), 389-401, 2001.
- [6] E. El-Shafey, "Removal of Zn (II) and Hg (II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk", *Journal of Hazardous Materials*, 175 (1-3), 319-327, 2010.
- [7] N. Asasian, T. Kaghazchi, and M. Soleimani, "Elimination of mercury by adsorption onto activated carbon prepared from the biomass material", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18 (1), 283-289, 2012.
- [8] S. H. Lee, C. H. Jung, H. Chung, M. Y. Lee, and J.-W. Yang, "Removal of heavy metals from aqueous solution by apple residues", *Process Biochemistry*, 33 (2), 205-211, 1998.
- [9] S.-A. Sajjadi, A. Mohammadzadeh, H. N. Tran, I. Anastopoulos, G. L. Dotto, Z. R. Lopicic, S. Sivamani, A. Rahmani-Sani, A. Ivanets, and A. Hosseini-Bandegharai, "Efficient mercury removal from wastewater by pistachio wood wastes-derived activated carbon prepared by chemical activation using a novel activating agent", *Journal of Environmental Management*, 223, 1001-1009, 2018.
- [10] Z. Liu, W. Yang, W. Xu, and Y. Liu, "Removal of elemental mercury by bio-chars derived from seaweed impregnated with potassium iodine", *Chemical engineering journal*, 339, 468-478, 2018.
- [11] C. T. Tovar, E. R. Paternina, J. G. Mercado, and J. M. Bohorquez, "Evaluación de la biosorción con bagazo de palma africana para la eliminación de Pb (II) en solución", *Prospectiva*, 13 (1), 59-67, 2015.
- [12] R. Howeler, N. Litaladio, and G. Thomas, "Save and grow: cassava, food and agriculture", *Rome: Organization of the United Nations*, 2013.
- [13] M. P. Cereda and M. Takahashi, "Cassava wastes: their characterization and uses and treatment in Brazil", *Cassava flour and starch: Progress in research and development*, (271), 221-232, 1996.
- [14] A. Bhatnagar, M. Sillanpää, and A. Witek-Krowiak, "Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification—a review", *Chemical engineering journal*, 270, 244-271, 2015.
- [15] M. Horsfall Jr and A. Abia, "Sorption of cadmium (II) and zinc (II) ions from aqueous solutions by cassava waste biomass (*Manihot esculenta* Cranz)", *Water research*, 37 (20), 4913-4923, 2003.
- [16] M. Pájaro and O. Romero, (2012) "Remoción de cromo (VI) en un medio acuoso mediante el uso de la cáscara de la yuca (*Manihot esculenta*).". Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Barranquilla.
- [17] ICONTEC, "Productos Químicos Industriales. Carbón Activado. Métodos de Ensayo," vol. NTC 4467, ed. Bogotá: ICONTEC, 1998, p. 30.
- [18] M. Carrier, A. Loppinet-Serani, D. Denux, J.-M. Lasnier, F. Hampichavant, F. Cansell, and C. Aymonier, "Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass", *Biomass and Bioenergy*, 35 (1), 298-307, 2011.
- [19] I. De La Calle, N. Cabaleiro, V. Romero, I. Lavilla, and C. Bendicho, "Sample pretreatment strategies for total reflection X-ray fluorescence analysis: A tutorial review", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 90, 23-54, 2013.
- [20] G. M. Gadd, "Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 84 (1), 13-28, 2009.
- [21] O. Corredor Becerra, (2008) "Evaluación del potencial energético de la biomasa residual proveniente de cultivos energéticos." Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander.
- [22] A. N. Kosasih, J. Febrianto, J. Sunarso, Y.-H. Ju, N. Indraswati, and S. Ismadi, "Sequestering of Cu (II) from aqueous solution using cassava peel (*Manihot esculenta*)", *Journal of Hazardous Materials*, 180 (1-3), 366-374, 2010.
- [23] P. Prinsen, "Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas", 2010.
- [24] C. G. Rocha, D. A. M. Zaia, R. V. da Silva Alfaya, and A. A. da Silva Alfaya, "Use of rice straw as biosorbent for removal of Cu (II), Zn (II), Cd (II) and Hg (II) ions in industrial effluents", *Journal of Hazardous Materials*, 166 (1), 383-388, 2009.
- [25] I. Ghodbane and O. Hamdaoui, "Removal of mercury (II) from aqueous media using eucalyptus bark: Kinetic and equilibrium studies", *Journal of Hazardous Materials*, 160 (2-3), 301-309, 2008.
- [26] V. A. Anagnostopoulos, I. D. Manariotis, H. K. Karapanagioti, and C. V. Chrysikopoulos, "Removal of mercury from aqueous solutions by malt spent rootlets", *Chemical engineering journal*, 213, 135-141, 2012.
- [27] M. Zabihi, A. H. Asl, and A. Ahmadpour, "Studies on adsorption of mercury from aqueous solution on activated carbons prepared from walnut shell", *Journal of Hazardous Materials*, 174 (1-3), 251-256, 2010.
- [28] A. Demirbas, "Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: a review", *Journal of Hazardous Materials*, 157 (2-3), 220-229, 2008.