

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**Evaluación de la capacidad adsorbente de columnas a base de
residuos de semilla y cáscara de aguacate *Persea americana* Hass para la
retención de cadmio (Cd^{2+}) y mercurio (Hg^{2+})**

Disertación previa a la obtención del título de Químico

ANDRÉS SEBASTIAN GÓMEZ NARANJO

Quito, 2023

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “Evaluación de la capacidad adsorbente de columnas a base de residuos de semilla y cáscara de aguacate Persea americana Hass para la retención de cadmio (Cd^{2+}) y mercurio (Hg^{2+})”, realizado por Andrés Sebastian Gómez Naranjo ,obteniendo un trabajo experimental que cumple con todos los requisitos estipulados por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Dr. Julio Vinueza
Director de la Disertación
Quito, 21 junio del 2023

DEDICATORIA

A mis padres que con su sacrificio me han permitido culminar mis estudios , a ellos por ser un apoyo incondicional y ser el faro que ilumina mi camino y me da animo en los momentos más difíciles de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, quiero expresarles mi profundo agradecimiento por su amor, paciencia y comprensión. Gracias por brindarme un entorno propicio para estudiar, por su apoyo emocional y por creer en mí en todo momento. Su constante aliento y motivación me impulsaron a alcanzar mis metas académicas

A mi tutor Dr. Julio Vinueza que, con dedicación supo guiarme para el desarrollo de la presente investigación

A Pamela Vélez, Gabriela Yáñez y David Romero, quienes con su ayuda supieron guiarme durante el desarrollo del proyecto. A los profesores del jurado MSc. Elizabeth Jara y Mtr. Augusto Oviedo.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y al CESAQ por la disponibilidad de materiales y equipos para el análisis del presente proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCION	3
3.1.METALES PESADOS	3
3.1.1. CADMIO	3
3.1.2. MERCURIO	4
3.2.CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS	4
3.2.1.TRATAMIENTO DE EFLUENTES QUE CONTIENEN METALES PESADOS	6
3.3.BIOSORCION	6
3.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOSORCIÓN DE METALES	7
3.4.AGUACATE	7
3.5.PRODUCCION Y EXPORTACION	8
4.OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS	9
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	9
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
5.MATERIALES Y MÉTODOS	10
5.1.OBTENCION Y TRATAMIENTO DEL BIOSORBENTE	10
5.2.ELABORACIÓN DE LA COLUMNA Y PERCOLACIÓN DE SOLUCIONES	11
5.3.CUANTIFICACIÓN DE METALES POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATOMICA.....	11
5.4.EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL pH	13
5.5.ISOTERMA DE ADSORSIÓN.....	13
5.5.1 LANGMUIR	13
5.5.2 FREUNDLICH	14
5.6.CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA.....	15
5.6.1. DENSIDAD REAL.....	15

5.6.2. DENSIDAD APARENTE	15
5.6.3. DETERMINACION DE LA POROSIDAD	16
5.6.4. DETERMINACIÓN DE CENIZA.....	16
5.6.5. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD	17
5.6.6. DETERMINACIÓN DEL pH DEL BIOSORBENTE.....	18
5.6.7. ESPECTROSCOPIA IR	18
6.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
6.1. CARACTERIZACIÓN DEL BIOSORBENTE	19
6.1.1. PROPIEDADES FISICAS	19
6.1.7. PROPIEDADES QUIMICAS	22
6.2.PORCENTAJE DE BIOSORCIÓN	26
6.2.1. CADMIO	26
6.2.2. MERCURIO	28
6.3.INFLUENCIA DEL PH EN LA CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN	29
6.3.1. CADMIO	29
6.3.2. MERCURIO	31
6.4.ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	32
6.4.1. CADMIO	33
6.4.2. MERCURIO	36
7.CONCLUSIONES	40
8.RECOMENDACIONES	41
9.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
10.FIGURAS	48
11.ANEXOS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Residuos de semilla y cáscara de aguacate	10
Figura 2. Espectro Infrarrojo biosorbente-lavado etanol.....	23
Figura 3. Espectro Infrarrojo biosorbente-lavado etilenglicol.....	24
Figura 4. Curva de calibración de cadmio obtenida en el equipo de FAAS..	26
Figura 5. Grafica porcentaje de remoción de Cd ²⁺ con diferentes lavados ..	27
Figura 6. Curva de calibración de mercurio obtenida en el equipo de FAAS	28
Figura 7. Grafica porcentaje de remoción de Hg ²⁺ con diferentes lavados ..	28
Figura 8. Efecto del pH en el porcentaje de adsorción de cadmio	30
Figura 9. Efecto del pH en el porcentaje de adsorción de mercurio.....	31
Figura 10. Isoterma de Langmuir para la adsorción de cadmio	34
Figura 11. Isoterma de Freundlich para la adsorción de cadmio	35
Figura 12. Isoterma de Langmuir para la adsorción de mercurio	37
Figura 13. Isoterma de Freundlich para la adsorción de mercurio.	38
Figura 16. Columnas a microescala a base de semilla y cáscara de aguacate	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Industriales generadoras de metales pesados	5
Tabla 2. Resultados experimentales de densidad real	19
Tabla 3. Resultados experimentales de densidad aparente	20
Tabla 4. Resultados experimentales de porosidad	20
Tabla 5. Resultados experimentales de cenizas totales	21
Tabla 6. Resultados experimentales de humedad.....	21
Tabla 7. Resultados experimentales de humedad.....	22
Tabla 8. Identificación de grupos funcionales del biosorbente de semilla y cáscara de aguacate mediante FTIR.....	25
Tabla 9. Parámetro modelo de Langmuir y Freundlich para cadmio	33
Tabla 10. Capacidad máxima de adsorción de Cd ²⁺ en distintos biosorbente.	35
Tabla 11. Parámetro modelo de Langmuir y Freundlich para mercurio	36

Tabla 12. Capacidad máxima de adsorción de Hg²⁺ en distintos biosorbente.	
.....	38
Tabla 13. Datos obtenidos en el estudio de porcentaje de remoción de cadmio.	
.....	50
Tabla 14. Datos obtenidos en el estudio de remoción de mercurio	51
Tabla 15. Resultado experimental del pH óptimo para remoción de cadmio	51
Tabla 16. Resultado experimental del pH óptimo para remoción de mercurio	
.....	52
Tabla 17. Parámetros isotérmicos para el proceso de adsorción de cadmio.	
.....	53
Tabla 18. Parámetros isotérmicos para el proceso de adsorción de mercurio.	
.....	53

1. RESUMEN

Actualmente se busca alternativas de bajo costo para remover metales pesados generados en aguas residuales durante las actividades industriales, agrícolas y domésticas, dando lugar al estudio de diversos residuos como posibles biosorbente, ya que se encuentran disponibles en grandes cantidades. El objetivo de la presente investigación es evaluar la capacidad adsorbente de residuo de semilla y cáscara de aguacate como alternativa para la remoción de iones cadmio y mercurio en agua residuales. En los procesos de adsorción se variaron algunos parámetros como el pH , concentración del metal y lavado del biosorbente. El estudio consistió en la elaboración de columnas con 1 gramo de biosorbente previamente lavada con etanol y etilenglicol con un tamaño de partícula menor a 600 μm . Posteriormente se percolaron 25 mL de las soluciones metálicas a diferentes concentraciones. Dichas soluciones fueron analizadas por espectroscopia de absorción atómica. Finalmente se realizaron pruebas a diferentes pH.

Los resultados indicaron que el biosorbente lavado con etanol presenta mejores porcentajes de remoción en todas las concentraciones a comparación del etilenglicol en ambos metales. Además, demostraron una buena capacidad de adsorción, presentado porcentajes de retención mayores a 38% para cadmio y 11% para mercurio. En cuanto a las isoterma de adsorción el modelo que mejor se ajusta para ambos metales es el de Langmuir con una capacidad máxima de adsorción de 0.333 mg/g para Cd^{2+} y 0.042 mg/g para Hg^{2+} . Posteriormente se determinó el pH óptimo de 5 para el proceso de adsorción ambos metales. Finalmente, se puede concluir que las columnas a base de semilla y cáscara de aguacate favorece la adsorción de soluciones acuosas de cadmio a comparación de soluciones acuosas de mercurio.

Palabras claves: Adsorción, biosorbente, cáscara y semilla de aguacate, metales pesados, pH.

2. ABSTRACT

Currently, low-cost alternatives are being sought to remove heavy metals generated in wastewater during industrial, agricultural and domestic activities, giving rise to the study of various residues as possible biosorbents, since they are available in large quantities. The objective of this research is to evaluate the adsorbent capacity of avocado seed and peel residues as an alternative for the removal of cadmium and mercury ions in wastewater. In the adsorption processes, some parameters such as pH, metal concentration and washing of the biosorbent were varied. The study consisted in the elaboration of columns with 1 gram of biosorbent previously washed with ethanol and ethylene glycol with a particle size of less than 600 μm . Subsequently, 25 mL of the metal solutions at different concentrations were percolated. These solutions were analyzed by atomic absorption spectroscopy. Finally, tests were performed at different pH.

The results indicated that the ethanol-washed biosorbent presented better removal percentages at all concentrations compared to ethylene glycol for both metals. In addition, they showed a good adsorption capacity, with retention percentages higher than 38% for cadmium and 11% for mercury. Regarding the adsorption isotherms, the best fitting model for both metals is the Langmuir model with a maximum adsorption capacity of 0.333 mg/g for Cd^{2+} and 0.042 mg/g for Hg^{2+} . Subsequently, the optimum pH of 5 was determined for the adsorption process of both metals. Finally, it can be concluded that the avocado seed and peel based columns favor the adsorption of aqueous solutions of cadmium compared to aqueous solutions of mercury.

Key words: Adsorption, avocado peel and seed, biosorbent, heavy metals, pH.

3. INTRODUCCION

3.1. METALES PESADOS

Son aquellos elementos químicos de origen natural que están presentes en la corteza terrestre los cuales poseen una densidad igual o superior a 5 g/cm^3 cuando se encuentran en su forma elemental (Navarro et al., 2007). Todavía no se ha establecido una sola definición para los metales pesados. Por lo cual, existen varias definiciones basadas en : peso atómico, número atómico y toxicidad (Agouborde , 2008). Los cuales se describen a continuación.

- **Peso atómico:** Metales con elevado peso atómico, en especial aquellos metales de transición que son tóxicos y no pueden ser procesados por organismos vivos.
- **Numero atómico:** Metal con número atómico mayor que el del calcio.
- **Toxicidad:** Elementos utilizados en la industria y que genéricamente son tóxicos para animales y personas

3.1.1. CADMIO

El cadmio es un elemento metálico brillante que presenta un color plateado y blanco lustroso, se caracteriza por su alta maleabilidad y resistencia a procesos corrosivos que se produce durante la fundición de otros metales, como el zinc, el plomo y el cobre. Es un metal divalente con 48 de numero atómico, de peso atómico 112,40 uma; con una densidad relativa de $8,65 \text{ g/cm}^3$. Es extremadamente tóxico, incluso en bajas concentraciones. Además, tiene una larga vida biológica media en el cuerpo humano, entre 10 y 33 años (Jaishankar et al., 2014).

Este metal es ampliamente empleado en diversas industrias debido a sus propiedades. Se puede encontrar presente en una variedad de ecosistemas, incluyendo plantas, animales, fuentes de agua, alimentos y suelos, en concentraciones tanto bajas como altas (Caviedes et al., 2015). La exposición a largo plazo de cadmio causa daño renal, altera el metabolismo del calcio en el cuerpo, y se han informado casos de cáncer de próstata y cáncer de pulmón en casos de alta exposición. Por lo cual, el Cd^{2+} es considerado un contaminante

prioritario desde una perspectiva de monitoreo por la mayoría de los países (Idrees et al., 2018).

Se encuentra naturalmente en minerales de zinc, plomo y cobre como óxidos complejos, sulfuros y carbonatos. Se libera a través de emisiones volcánicas y la quema de combustibles fósiles y biomasa (Mendoza & Fuentes Molina, 2014). Las fuentes antropogénicas de cadmio provienen principalmente de la industria de fundición de metales, fertilizantes y minería (Perez et al., 2012).

3.1.2. MERCURIO

El mercurio se encuentra en la corteza terrestre combinado con el azufre. Es un metal pesado ligeramente volátil a temperatura ambiente, cuando se encuentra en su forma elemental, se presenta como un líquido plateado de alta densidad. Tiene la capacidad de formar enlaces con otros compuestos, como el mercurio en sus formas monovalente o divalente, dando lugar a la formación de compuestos orgánicos e inorgánicos de mercurio. Posee una masa atómica relativa de, 80 de número atómico, de peso atómico 200,6 uma; con una densidad relativa de 13,55 g/cm³ (Velásquez et al., 2020).

Debido a que es un metal tóxico, la exposición simultánea puede tener efectos acumulativos por lo cual una alta dosis de exposición al mercurio, puede inducir complicaciones graves como dolor cólico abdominal e insuficiencia renal (Tchounwou et al., 2012). Por otro lado, la exposición a dosis bajas es una sutil amenaza, ya que puede tener repercusiones en la salud por ejemplo, trastornos neuropsiquiátricos (Balali et al., 2021).

El origen de la contaminación pueden ser procesos naturales entre estos se encuentra los volcanes, manantiales geotérmicos, depósitos geológicos y el océano (Demers et al., 2013). La mayor contaminación por parte del mercurio proviene de actividades humanas debido a que se realiza una variedad de procesos industriales, como por ejemplo: incineración o eliminación de productos que contienen mercurio, el uso de mercurio para producir cloro en la industria cloro-álcali, pero principalmente por la combustión de carbono (Wang et al., 2004).

3.2. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS

Actualmente existe una preocupación creciente por la contaminación ambiental de metales pesados debido a que ha sido usado ampliamente en

procesos industriales para la producción de utensilios de cocina, herramientas y artículos de uso diario (Cabrera,2017). El problema deriva en que estos elementos son peligrosos, ya que no se pueden degradar química o biológicamente, causando así acumulación con el tiempo, lo que conduce a presencia de muchos metales en el medio ambiente. (Caviedes et al., 2015)

Entre los metales y metaloides más perjudiciales se encuentran el plomo, mercurio, arsénico y cadmio, los cuales representan una preocupación debido a sus efectos cancerígenos en los organismos vivos (Tejada et al., 2014). Sin embargo el mercurio y el cadmio son 2-20 veces más dañino que otros metales pesados (Rafique et al., 2021). La presencia de estos elementos en las descargas industriales ocasiona alteraciones en la composición física, química y biológica de los cuerpos de aguas (Vera et al., 2015).

A continuación, en la Tabla 1 se muestra los diferentes tipos de metales pesados que se encuentran presentes en distintas industrias

Tabla 1. Industriales generadoras de metales pesados

<i>Industria</i>	Cd^{2+}	Hg^{2+}	Pb	As	Cu	Ni
<i>Minería de metales</i>	X				X	X
<i>Fundiciones</i>	X		X	X		
<i>Extracción de minerales</i>	X		X	X	X	X
<i>Metalurgia</i>			X		X	
<i>Aleaciones</i>	X			X	X	X
<i>Baterías</i>	X	X	X			X
<i>Gestión de Residuos</i>	X	X	X		X	X
<i>Pinturas</i>			X	X		
<i>Químicos orgánicos</i>	X	X	X			

Fuente: (Caviedes et al., 2015)

Ecuador, al igual que muchos otros países, ha establecido regulaciones y legislaciones específicas para controlar la presencia de metales pesados en el medio ambiente. En este sentido, la TULSMA (El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente) es una ley que establece medidas y criterios para la prevención y control de la contaminación ambiental, incluyendo la presencia de metales pesados en el agua (Ministerio del Ambiente, 2014).

La TULSMA menciona que el límite seguro de descarga de efluentes al recurso agua de cadmio (Cd^{2+}) recomendado es de 0,02 mg/L. Mientras que el límite seguro de mercurio (Hg^{2+}) es 0,006 mg/L (TULSMA, 2015).

3.2.1. TRATAMIENTO DE EFLUENTES QUE CONTIENEN METALES PESADOS

Se han utilizado tecnologías y métodos diferentes en la remediación en ambientes que están contaminados con metales pesados. Estos se dividen en métodos fisicoquímicos como ósmosis inversa, filtración, oxidación química, lixiviación química, electrodinámica, entre otros. Sin embargo estos métodos utilizan una alta cantidad de solventes, mucha mano de obra y están limitados por sus costos altos (Sayqal & Ahmed, 2021).

Por otro lado, el método biológico se basa en la degradación del metal mediante la actividad biológica de microorganismo, estos tratamientos pueden incluir los lodos activos con microorganismos o los percoladores (Sayqal & Ahmed, 2021). Sin embargo, posee ciertas desventajas debido a que requiere manejo y mantenimiento de los microorganismos, es ineficaz en compuestos no degradables, presenta posible acumulación de espuma de lodos y genera lodos biológicos y productos de degradación no controlados (Crini & Lichtfouse, 2019)

3.3. BIOSORCION

La biosorción es un proceso ambiental de control que implica la eliminación de contaminantes utilizando biomasa inerte. Dicho proceso se realiza mediante fenómenos químicos como intercambio iónico o fenómenos físicos como la adsorción. Consiste en una fase sólida y líquida donde se encuentran los iones metálicos que serán adsorbidos. (Bermejo, 2016).

- **ADSORCION**

Es una adsorción física la cual se da por fuerzas débiles de atracción y, generalmente, no específicas, como las fuerzas de Van der Waals La unión ocurre entre la superficie del material sorbente y el metal, generando una interacción. En el caso de la biosorción, esta unión es rápida, reversible y tiende a alcanzar el equilibrio de forma rápida (Kammerer et al., 2011).

Los materiales adsorbentes son capaces de retener moléculas o iones de

otra sustancia en su superficie. Sus propiedades incluyen alta área superficial y porosidad (Dunay, 2022).

- **INTERCAMBIO IONICO**

Durante el proceso, el material sólido empleado posee grupos con cargas que entran en interacción con los iones cargados existentes en la solución líquida. Es un intercambio reversible de iones entre sólido y líquido en el que no existe cambios permanentes en su estructura (Córdova, 2016).

3.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOSORCIÓN DE METALES

- **pH:** El pH afecta a los grupos funcionales del biosorbente y a los iones metálicos (Wei et al., 2016). Generalmente, la biosorción de cationes tiende a ser favorecida para valores de pH superiores a 4,5 , mientras que la adsorción de aniones muestra preferencia por valores de pH entre 1,5 y 4. (Chojnacka, 2010).
- **Tamaño de partícula:** A un menor tamaño de partícula existe una mayor área superficial, por lo cual, también aumenta el número de sitios activos presente en el biosorbente, permitiendo que el adsorbato llegue a ellos con mayor facilidad (Malkoc & Nuhoglu, 2006). Se ha demostrado que el rango óptimo para adsorción de iones metálicos esta entre 400 - 600 μm (Ugwu et al., 2020).
- **Concentración del metal:** En general, a medida que la concentración del metal en la solución aumenta, la capacidad de adsorción del adsorbente disminuye debido a la saturación de la superficie de adsorción disponible. (Kumar et al., 2010).

3.4. AGUACATE

El árbol de aguacate pertenece a la familia *Lauraceae* y al género *Persea*, es originario de América Central y se ha distribuido ampliamente en muchas áreas tropicales y subtropicales de todo el mundo (Bernal et al., 2008). La variedad de aguacate 'Hass' es la más importante del mundo, considerada 85% guatemalteca y 15% mexicana (Domínguez et al., 2014). Las utilidades que presenta el aguacate son muchas debido a su alto valor energético y nutritivo, se considera una importante fruta tropical rica en proteínas y vitaminas liposolubles las cuales no

poseen otras frutas, como vitaminas A, niveles medios de vitaminas D, E y vitaminas hidrosolubles como la B. Es utilizado en productos de la industria gastronómica, farmacéutica y cosmética (Araújo et al., 2018).

La cáscara del aguacate contiene alrededor del 4% al 10% de grasa total, del 5% al 9% de proteína cruda y del 50% al 60% de fibra cruda porque contiene polisacáridos como celulosa, hemicelulosa y lignina. Las semillas de aguacate contienen del 2 % al 4 % de grasa total, del 4 % al 7 % de proteína cruda y del 2 % al 8 % de fibra cruda (Domínguez et al., 2014).

3.5. PRODUCCION Y EXPORTACION

El aguacate es muy demandado en los mercados de importación internacionales (Dabas et al., 2013). A nivel mundial, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en Europa se produjeron 138.790 t, mientras que en Norteamérica la producción fue de 71.860 t, en Centroamérica de 137.120 t y en Sudamérica de 139,69 t. Por otro lado, según la Cámara de Comercio del Ecuador (CCE), se produjeron 20.995 toneladas de aguacate en el país (Alvarez, 2018). En Ecuador se cultivan la variedad Hass que se produce en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Tungurahua, Bolívar, Azuay, Santa Elena y Loja. Según el Ministerio de la Producción, Ecuador exportó 600 toneladas de aguacate en 2021, lo que genera una cantidad análoga de residuos de su semilla y cáscara (Álvarez, 2022).

La idea del presente trabajo es que residuos de cáscara y semilla de aguacate puede ser un material adsorbente efectivo y de bajo costo para la eliminación de los metales cadmio y mercurio en aguas residuales. Esto se basa en la información proporcionada en el marco teórico, en el cual se menciona que los residuos, son una alternativa ecológica y efectiva para la remoción de metales pesados en aguas residuales por sus propiedades de adsorción. En particular, se destaca el potencial de los residuos del aguacate debido a su contenido de compuestos orgánicos que les permiten unirse a los metales pesados. Por lo tanto, se espera que el estudio demuestre que los residuos del aguacate pueden ser una solución efectiva para la remoción de Hg^{2+} y Cd^{2+} en aguas residuales, lo que tendría un impacto positivo en el medio ambiente.

4. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad adsorbente del residuo de semilla y cáscara de aguacate como alternativa para la remoción de cadmio (Cd^{2+}) y mercurio (Hg^{2+}) en agua.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar columnas a microescala a base de residuo de semilla y cáscara de aguacate.

Analizar la concentración de cadmio (Cd^{2+}) y mercurio (Hg^{2+}) adsorbido en el residuo de semilla y cáscara de aguacate mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Evaluar la capacidad máxima de adsorción de cadmio y mercurio del biosorbente preparado a partir de semilla y cáscara de aguacate.

Establecer la influencia del pH en la adsorción de cadmio (Cd^{2+}) y mercurio (Hg^{2+}) para maximizar la capacidad adsorbente.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. OBTENCION Y TRATAMIENTO DEL BIOSORBENTE

El biosorbente (residuos de semilla y cáscara de aguacate) se obtuvo deshidratada y molida de la empresa "MIRA avocado oil" ubicada en la provincia de Carchi. Se recolectó la cantidad de 10 kg de muestra y se transportó al laboratorio.



Figura 1. Residuos de semilla y cáscara de aguacate

Para el tratamiento se tomó la metodología presentada por Aiyesanmi et al (2020), realizando las siguientes modificaciones: se trituro el biosorbente con ayuda de un molino de café marca Hammilton Beach. Luego, se pasó por un tamiz de malla de 600 μ m marca Soiltest, a continuación, se pesó en una balanza semianalítica marca de dos decimales BOECO Germany 10 g del biosorbente y se colocó en un frasco ámbar. Posteriormente, se preparó 100 ml de etanol al 40% v/v, preparado en un balón aforado a partir de etanol al 96% v/v y agua tipo 1 calidad alta pureza (resistividad 18.2 $M\Omega \cdot cm$ a 25 °C) obtenida de un sistema de agua pura directa Genie 5 Direct-Pure Water System marca Rephile, China y se trasvasó al mismo frasco ámbar, luego se agitó con ayuda de un vortex marca Heathrow Scientific a 3000 rpm durante aproximadamente un minuto.

Se realizó el mismo procedimiento en otro frasco ámbar pero ahora se añadió 100 ml de etilenglicol 40%, preparado en un balón aforado a partir de etilenglicol grado técnico. Ambos frascos se dejaron en maceración durante 4 días y se agitó durante 5 minutos cada día. Transcurrido el tiempo de maceración, el

biosorbente se filtró al vacío con ayuda de una bomba marca Millipore, papel filtro, matraz Kitasato y un embudo Buchner. A continuación, el biosorbente se pasó a una cama de aluminio y se secó a 60 °C durante 24 horas en una estufa marca Memmert. Finalmente, se tamizó nuevamente la biomasa a 600 mm para obtener una partícula homogénea y se almacenó dentro de fundas Ziploc en un desecador de vidrio.

5.2. ELABORACIÓN DE LA COLUMNA Y PERCOLACIÓN DE SOLUCIONES

Para la elaboración de la columna en una balanza analítica marca Mettler Toledo se colocó un vaso de precipitación de 50 mL con una jeringa de 5 ml marca NIPRO. Luego con ayuda de una espátula se pesó 1 g del biosorbente (semilla y cáscara de aguacate) dentro de la jeringa. Posteriormente, se compactó el biosorbente con ayuda del mismo émbolo de la jeringa durante 10 segundos. Luego se colocó en un colector de cartucho Waters de 20 posiciones.

Se prepararon 100 mL de soluciones acuosas de cadmio y mercurio a diferentes concentraciones de 2 ,5 ,10 ,12 ,15 ,20 ,25 ,30 mg/L y 0.2, 0.5, 0.75, 1 ,2 ,3 ,5,10, 15 mg/L respectivamente a partir de un estándar de cadmio (1000 ± 3 µg/mL), Inorganic Ventures, Estados Unidos y estándar de mercurio (1.000 ± 10 µg/mL), Inorganic Ventures, Estados Unidos. Se toman alícuotas de 25 mL de cada solución y se pasan por los filtros elaborados. Finalmente, se recolectó el líquido percolado en un vaso de precipitación y se guardaron las soluciones hasta el análisis por espectroscopía de absorción atómica de llama FAAS. El proceso se trabajó por triplicado de un solo lote de muestra de biosorbente a una temperatura de 20°C, con una variación de ± 5 °C.

5.3. CUANTIFICACIÓN DE METALES POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

La espectroscopía de absorción atómica es una técnica ampliamente utilizada desde hace décadas para la detección de metales en concentraciones muy bajas, en el rango de partes por millón. Esta técnica se basa en las transiciones electrónicas únicas de cada metal, lo que la hace específica y altamente sensible. Existen distintos métodos para atomizar las muestras entre ellos los siguientes:

- **Por llama:** El aerosol de muestra se mezcla con el combustible y pasa a través de una serie de deflectores. Se quema en un mechero de una ranura que produce una llama de 5 a 10 cm. de longitud.
- **Generación de hidruros:** Se usa reductores y una cámara de cuarzo, se pueden analizar los elementos capaces de formar hidruros volátiles. Se generan rápidamente adicionando una solución de borohidruro de sodio a una cantidad de la muestra acidificada (PerkinElmer, 2007).

En resumen, consiste en un haz de luz que atraviesa un sistema de atomización con partículas gaseosas de la muestra, luego pasa por un monocromador para eliminar la radiación no deseada y finalmente llega al detector, donde se absorbe la radiación, se procesa y se amplifica, generando una lectura (Wilma Gallegos, 2012).

Para la cuantificación de cadmio mediante espectrofotómetro de Absorción Atómica (FAAS), se utilizó el equipo Analyst 400, marca Perkin Elmer. El método está basado en el estándar de la APHA-AWWA-WEF 3111 A: Metales por espectrofotometría de absorción atómica de llama. Se preparó una solución madre para cadmio a partir del estándar de cadmio ($1000 \pm 3 \mu\text{g/mL}$), Inorganic Ventures, Estados Unidos. A partir de la solución madre de cadmio se prepararon las soluciones para la curva de calibración de 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 1.0 mg/L, así como las soluciones de sensibilidad y control de 0.5, y 0,07 mg/L. Cada solución se preparó en balones aforados de 50mL y se aforó con agua tipo 1.

Mientras que la cuantificación de mercurio se realizó mediante la técnica instrumental espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros. A partir del estándar de mercurio ($1.000 \pm 10 \mu\text{g/mL}$), Inorganic Ventures, Estados Unidos, se prepara una solución madre de 1mg/L. Luego a partir de la solución madre de mercurio se preparó soluciones para la curva de calibración de 20, 50, 100 y 200 $\mu\text{g/L}$ y las soluciones de sensibilidad y control de 250, 30 y 60 $\mu\text{g/L}$. Por otro lado, se preparó el agente reductor con hidróxido de sodio al 1% para luego hacer una solución de borohidruro de sodio 3%. Adicionalmente se preparó soluciones de ácido clorhídrico 1,5% y permanganato de potasio.

En la cámara de reacción se agregó el borohidruro de sodio 3%, mientras que en los viales de reacción se agregó 10 ml de HCl, se añadió dos gotas de

KMnO₄ y se procedió a poner la muestra de interés. Para la lectura en el equipo, se debe presionar las opciones estándares o blanco al mismo tiempo que se presiona la válvula del reductor del sistema MHS durante 12 segundos. Cada solución se preparó en balones aforados de 50 mL y se aforó con agua tipo 1.

5.4. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL pH

El pH de las soluciones con iones metálicos se controló mediante la adición de HCl 1M y NaOH 1M, se ajustó entre los valores de pH de 2, 3, 4, 7, 9 y 10 para Cd²⁺ y Hg²⁺. Esto se llevó a cabo usando soluciones diluidas de HCl e NaOH y con ayuda de una pipeta Pasteur se agregó gota a gota hasta alcanzar el pH deseado. El pH se controló con un pH-metroHach SensION 1. Para medir el pH de las muestras, primero se debe realizar la calibración del pHmetro, cada vez que se utilice. En la calibración se utilizó soluciones buffer de pH 4, 7 y 10. Para la calibración del pHmetro y mediciones correspondientes se siguió el procedimiento correspondiente.

5.5 ISOTERMA DE ADSORSIÓN

Un modelo de isoterma de adsorción apropiado ayuda a comprender el mecanismo del proceso, análisis de medidas experimentales y predicción de las condiciones operativas óptimas (Aiyesanmi et al., 2020). Los modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich fueron usados para analizar las mediciones experimentales de equilibrio para la biosorción de iones de cadmio y mercurio en el biosorbente.

5.5.1 LANGMUIR

Las isotermas de Langmuir proporcionan una descripción cuantitativa de la formación de una capa única de adsorbato en la superficie externa del adsorbente, donde ya no hay espacio adicional para la adsorción. De esta manera, estas isotermas representan la distribución en equilibrio de iones metálicos entre las fases sólida y líquida (Oyeyemi, 2012). El modelo de Langmuir se rige bajo la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Langmuir

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{q_{max}} C_e + \frac{1}{K_L * q_{max}}$$

Donde:

C_e = Concentración en equilibrio (mg/L)

q = Capacidad adsorbente en el equilibrio (mg/g)

q_{\max} = capacidad máxima de adsorción (mg/g)

K_L = Constante de Langmuir (L/mg)

Un indicador más fiable, que sirve para demostrar que los datos pertenecen a la isoterma Langmuir es el factor de separación o R_L , el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Factor de separación

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L * C_i}$$

Donde:

C_i = Concentración inicial del adsorbato (mg/L)

K_L = Constante de Langmuir (L/mg)

5.5.2 FREUNDLICH

A menudo se utiliza para describir las propiedades de adsorción de superficies heterogéneas. Estos datos corresponden en general a la ecuación empírica propuesta por Freundlich (Aiyesanmi et al., 2020).

Ecuación 3. Freundlich

$$\text{Log } q = \frac{1}{n} \text{log } C_e + \text{log } K_f$$

Donde:

C_e = Concentración en equilibrio (mg/L)

q = Capacidad adsorbente en el equilibrio (mg/g)

n = factor de heterogeneidad

K_L = Constante de Freundlich (L/g)

5.6. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA

Mediante diferentes técnicas se realizó la identificación de las distintas características que posee la semilla y cáscara de aguacate acondicionada como biosorbente. Todos los procesos se realizaron pruebas por triplicado.

5.6.1. DENSIDAD REAL

Se llevó a cabo mediante el método propuesto por Cabrear Luis (2017) . El método usado para determinar la densidad real de un sólido es el del picnómetro. Primero se determina el peso del picnómetro que se va a usar, luego se agrega 0,5 g de la muestra y se pesa. Posteriormente se afora el mismo con agua destilada y se pesa. Por último, se pesa el picnómetro solo con agua destilada y con los datos obtenidos se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Densidad real

$$\delta R = \frac{W_{pm} - W_p}{m + W_{pw} - W_{pmw}} * \delta w$$

Donde:

m = masa de la muestra

W_p = peso del picnómetro vacío

W_{pm} = peso del picnómetro con la muestra

W_{pw} = peso de picnómetro con agua

W_{pmw} = peso del picnómetro con la muestra y aforado con agua destilada

δw = densidad del agua

5.6.2. DENSIDAD APARENTE

Se llevó a cabo mediante el método establecido en la Norma Técnica Ecuatoriana (INEN 1162, 20113). El método consiste en introducir 2g de la muestra en una probeta previamente pesada y compactarla hasta que se encuentre homogéneamente distribuida, luego se mide el volumen ocupado por la muestra y se pesa la probeta con la muestra con los datos obtenidos se aplica la siguiente ecuación.

Ecuación 5. Densidad aparente

$$\delta A = \frac{m}{V}$$

Donde:

m = masa del sólido seco

V= volumen ocupado por la muestra

5.6.3. DETERMINACION DE LA POROSIDAD

Se llevó a cabo mediante el método propuesto por Cabrear Luis (2017). La porosidad de un sólido es importante en los estudios de adsorción ya que nos proporciona un estimado de la estructura de la superficie del sólido, y ahí es donde se va a retener los iones metálicos. La porosidad se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Porosidad

$$E = \frac{\delta R - \delta A}{\delta R}$$

Donde:

δR = Densidad real.

δA = Densidad aparente.

5.6.4. DETERMINACIÓN DE CENIZA

Para la determinación de ceniza se siguió el método de ensayo propuesto por Carter & Gregorich (2007). En primer lugar, se colocó el crisol y la tapa en la mufla y se mantuvo a una temperatura de 105-110 °C durante una hora. Posteriormente, el crisol se retiró de la mufla y se colocó en un desecador para que se enfriara.

Luego, se procedió a pesar el crisol y la tapa vacía en una balanza analítica. Se tomaron 2 g de la muestra y se secaron a 105 °C durante una hora. Después, se aumentó la temperatura de la mufla a 375 °C.

Seguidamente, se retiró la tapa del crisol y se dejó la muestra en la mufla a una temperatura de 375 °C durante una hora. Una vez transcurrido este tiempo, se subió la temperatura a 550 °C y se dejó durante una hora.

Una vez finalizado el proceso, se retiró el crisol de la mufla, se colocó la tapa y se dejó enfriar en un desecador. Una vez que el crisol alcanzó temperatura ambiente, se procedió a pesar nuevamente en la balanza analítica. Este proceso se calcula a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Porcentaje de cenizas totales

$$\% \text{ Cenizas} = \left[\frac{(A - C)}{B} \right] * 100$$

Donde:

A: Peso final del crisol con la muestra después de la calcinación (g)

B: Peso de la muestra

C: Peso de crisol tarado con tapa(g)

5.6.5. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

En cuanto a la caracterización química, se cuantificó el porcentaje de humedad por el método de ensayo propuesto por Carter & Gregorich (2007).

En primer lugar se llevó la cápsula al desecador y se esperó a que alcanzara temperatura ambiente, aproximadamente 15 minutos.

Luego, se procedió a pesar la cápsula tarada y a pesar 5 g de muestra, anotando el peso correspondiente. La cápsula con muestra se colocó en una estufa a una temperatura de 105 ± 5 °C y se dejó durante una hora.

Una vez transcurrido este tiempo, se retiró la cápsula de la estufa y se colocó en un desecador para que enfriara hasta alcanzar temperatura ambiente. Posteriormente, se pesó la cápsula que contenía la muestra seca y se anotó el peso correspondiente. Este proceso se calcula a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Porcentaje de humedad

$$\%H = \frac{(A - B) * 100}{C}$$

Donde:

A: Peso cápsula tarada + peso de la muestra (g)

B: Peso de la cápsula tarada + peso de la muestra seca (g)

C: Peso de la muestra (g)

5.6.6. DETERMINACIÓN DEL pH DEL BIOSORBENTE

Para determinar el pH de la cáscara y semilla de aguacate se pesó 10 g de la muestra con un tamaño de partícula de 600 μm y se disolvió en 90 mL de agua grado reactivo, se agitó durante 15 minutos y por último se midió el pH de la mezcla utilizando un pH-metroHach SensION 1.

5.6.7. ESPECTROSCOPIA IR

Se usa para estudiar moléculas que absorben en la región infrarroja, la cual da mayor información sobre las vibraciones de las moléculas. La absorción de radiación que obtiene la muestra a analizar nos proporciona información sobre grupos funcionales y tipo de enlace que posee la muestra (Gómez & Murillo, 2001)

Los espectros infrarrojos del biosorbente se obtuvieron usando el espectrofotómetro Perkin Elmer Spectrum BX FT IR con complemento ATR, los datos fueron analizados con el software Spectrum v5.0.1. Para cada muestra se realizaron 20 scans en un rango de 400-4000 cm^{-1} , las mediciones se realizaron en transmitancia.

En cada caso, se realizó la corrección del background respectiva. Se colocó en el cristal porta muestras, una o, se puede utilizar software especializado para la construcción de tablas y gráficos que permitan visualizar de forma adecuada los resultados obtenidos. En el caso de esta investigación, se utilizó el programa Originlab para la elaboración de gráficos y Excel para tablas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. CARACTERIZACIÓN DEL BIOSORBENTE

Las condiciones experimentales en todos los análisis se realizaron por triplicado a una temperatura de $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Los biosorbentes poseen una serie de propiedades físicas que los hacen efectivos para la adsorción de contaminantes. Estas propiedades incluyen densidad real y aparente, la porosidad y el tamaño de partícula. Dichas propiedades pueden ayudar a mejorar el diseño de los biosorbente para su uso en la eliminación de contaminantes en aguas.

6.1.2. DENSIDAD REAL

Tabla 2. Resultados experimentales de densidad real

Densidad real (g/mL)	Desviación estándar
0.9625	0.151

La densidad real del biosorbente obtenida se basa en la relación entre la densidad de una muestra y la densidad de una sustancia pura de la misma composición. Como se observa en la Tabla 2 fue de $0.9625\text{ g/mL} \pm 0.150$, debido a que no existe un estudio sobre el tema se realizó la comparación con la información obtenida por Tamay (2019), de la corona de piña el cual fue de 0.895 g/ml y del bagazo de caña obtenido por Vera et al. (2015), la cual es 1.08 g/mL , como se observa dichos resultados son muy similares.

6.1.3. DENSIDAD APARENTE

Tabla 3. Resultados experimentales de densidad aparente

Densidad aparente (g/mL)	Desviación estándar
0.3075	0.014

La densidad aparente del biosorbente fue obtenida mediante la densidad de un material granular dividida por el volumen total que ocupa en un recipiente. Como se observa en la Tabla 3 fue de $0.3075 \text{ g/mL} \pm 0.014$. En otros estudios se obtuvo valores de 0,141 y 0,36 g/mL para bagazo de caña y cáscara de cacao respectivamente (Bermejo,2016). Como menciona Ordóñez (2017), al tener una mayor densidad aparente, se espera que la capacidad de remoción de iones metálicos aumente. Se observa que la semilla y cáscara de aguacate presentan propiedades más afines para la adsorción de metales en comparación con el bagazo de caña, pero en menor medida que la cáscara de cacao.

6.1.4. POROSIDAD

Tabla 4. Resultados experimentales de porosidad

Densidad real (g/mL)	Densidad aparente (g/mL)	Porosidad	Desviación estándar
0.9625	0.3075	0.6805	0.041

La porosidad del biosorbente fue obtenida mediante la relación entre la densidad real y la aparente. Como se observa en la Tabla 4 el biosorbente posee una porosidad de 0.6805 ± 0.041 . Los resultados se pueden comparar con los datos obtenidos de Bermejo (2016), el cual es 0,6806 para la cáscara de cacao. Además Pintado (2018), menciona que la tuza de maíz tiene una porosidad de 0,641. Cabe recalcar que la semilla y cáscara de aguacate posee mayor porosidad que los biosorbente mencionados anteriormente, lo que podría contribuir a una mayor remoción de metales pesados.

6.1.5. CENIZAS TOTALES

Tabla 5. Resultados experimentales de cenizas totales

Promedio(%)	Varianza	Desviación estándar
3.097	0.412	0.703

En la Tabla 5 se puede observar que el biosorbente posee un porcentaje de cenizas totales de 3.09%, presentando una varianza y desviación estándar menor a 1, lo cual quiere decir que las réplicas realizadas fueron similares. El resultado obtenido se encuentra entre el porcentaje obtenido por Tesfaye et al. (2022) en la semilla pelada de aguacate siendo este de 3.4%. El porcentaje obtenido es menor al que obtuvo Verdugo (2017), donde uso cáscara de mandarina con 5,49% de cenizas totales. En otros estudios realizados por Vasco (2008), en el cual utilizaron zanahoria como biosorbente obteniendo un valor de 0,14%. Los valores elevados de cenizas totales en los biosorbente no son buenos, debido que indican la presencia de impurezas las cuales interfieren en el proceso de captación de iones metálicos. Por lo tanto los resultados obtenidos de la semilla y cáscara son aceptables.

6.1.6. HUMEDAD

Tabla 6. Resultados experimentales de humedad

Promedio(%)	Varianza	Desviación estándar
7.76	0.611	0.047

De acuerdo con la Tabla 6 se puede observar que el biosorbente estudiado presenta una humedad con un promedio de 7.86%, presentando una varianza y desviación estándar menor a 1, lo cual quiere decir que las réplicas realizadas fueron similares. Cabe recalcar que dichos valores están entre 5 a 10% establecido por Cardona et al. (2013), el cual utiliza la cáscara de naranja como biosorbente y menciona que altos valores de humedad puede llegar a ser contraproducente debido al crecimiento de bacterias y por la formación de aglomerados. El trabajo experimental de la determinación de la capacidad de biosorción y desorción de la

corona de piña realizado por Tamay (2019), obtuvo una humedad de 8,21%. A diferencia del estudio de Coronel (2017), la humedad de la tuza de maíz fue de 5,98%.

Es importante tener en cuenta que el exceso de humedad en los biosorbente puede afectar su capacidad de adsorción, ya que un exceso de humedad puede causar una reducción en la adsorción debido a la competencia con las moléculas de agua por los sitios de adsorción. Por lo tanto, es importante controlar el contenido de humedad durante su preparación y almacenamiento.

6.1.7. PROPIEDADES QUIMICAS

Los biosorbentes tienen varias propiedades químicas que los hacen muy efectivos en la adsorción de contaminantes. Estas propiedades incluyen la presencia de ciertos grupos funcionales, la capacidad de interactuar electrostáticamente, la afinidad por ciertos iones y la capacidad de formar enlaces químicos con contaminantes.

6.1.8. PH DEL BIOSORBENTE

Tabla 7. Resultados experimentales de humedad

Promedio	Varianza	Desviación estándar
5.14	0	0

De acuerdo con la Tabla 7 se puede observar que el biosorbente estudiado presenta un pH promedio de 5.14 , presentando una varianza y desviación estándar de 0. El pH obtenido hace referencia a un pH ácido, según los estudios realizados por Cabrera (2017) y Pintado (2018), sobre la cáscara de tomate de árbol y tuza de maíz tiene un pH de 4.5 y 4 respectivamente. Por lo que el valor obtenido se encuentra por encima del estimado.

Tejada (2014), menciona que para la biosorción de metales pesados en aguas residuales el pH tiene un impacto significativo, debido a la presencia de iones hidronios, por lo cual valores por encima de 4.5 suele tener mayor adsorción de cationes.

6.1.9. ANALISIS DE INFRARROJO

Se realizó análisis de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), en primer lugar se analizó el biosorbente sometido al lavado con etanol y el segundo lugar se analizó el biosorbente sometido al lavado con etilenglicol para identificar los grupos funcionales presentes para su uso como biosorbente.

Se determinó así la composición del biosorbente y principales grupos funcionales con la ayuda de tablas, las cuales se muestran a continuación

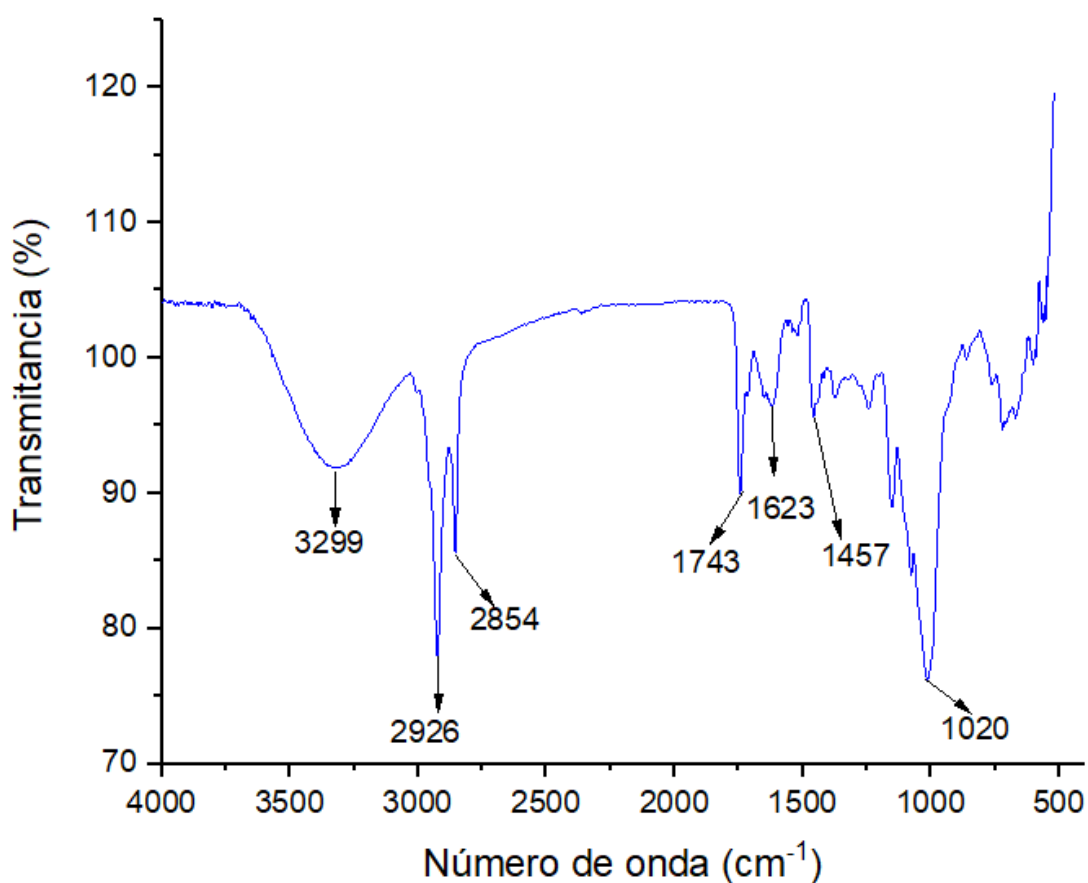


Figura 2. Espectro Infrarrojo biosorbente-lavado etanol

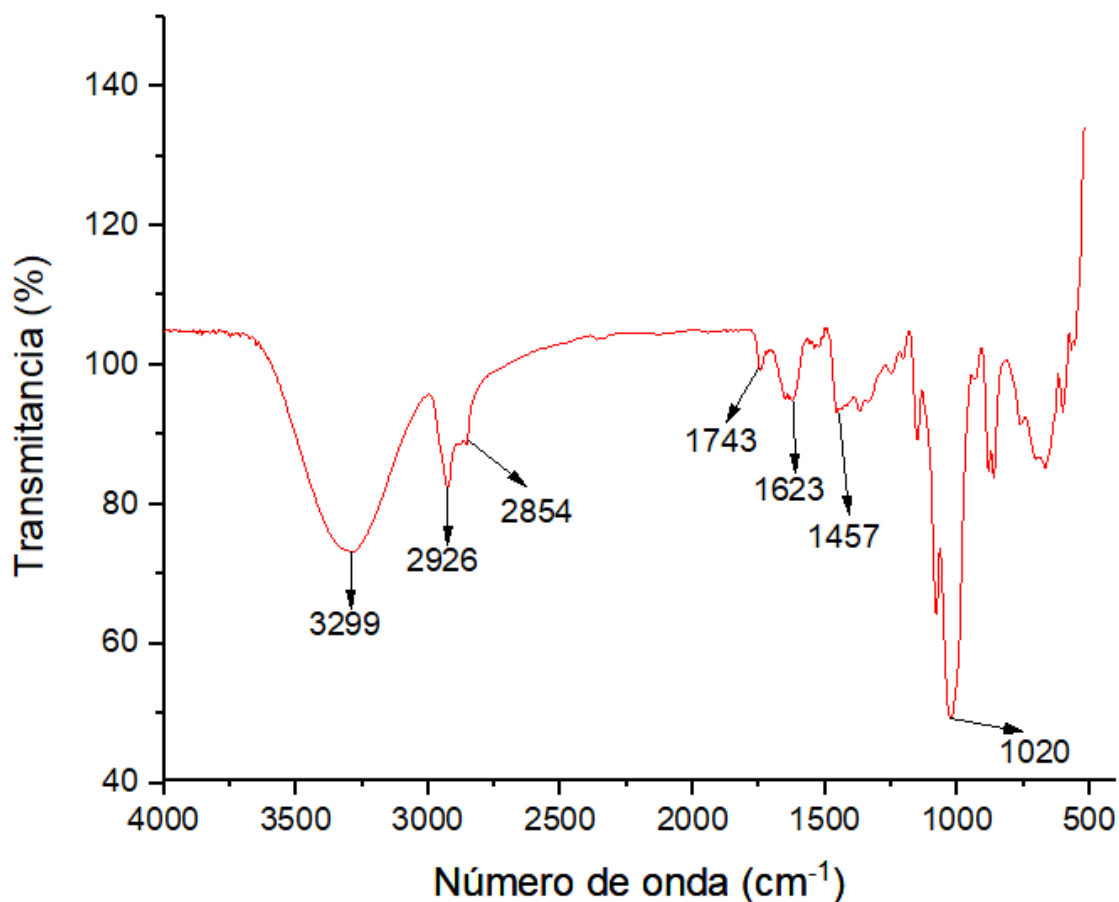


Figura 3. Espectro Infrarrojo biosorbente-lavado etilenglicol

Como se observa en la Figura 2 y 3 los dos solventes utilizados no afectaron significativamente las propiedades estructurales de la muestra de biosorbente debido a que las bandas de absorción de ambos lavados se encuentran en las mismas longitudes de onda. Esto nos indica que los compuestos que se encuentran en el biosorbente no han sufrido cambios químicos al someterlos a lavados con etanol y etilenglicol.

Por otro lado, los resultados obtenidos sugieren que los compuestos presentes en el biosorbente no son solubles en los solventes utilizados, es decir que los lavados no han modificado ni extraído la composición química de la muestra.

Tabla 8. Identificación de grupos funcionales del biosorbente de semilla y cáscara de aguacate mediante FTIR

Enlace	Distancia	Grupo funcional
O-H	3299.15	Hidroxilo
C-H, C-H2	2926.02	Alcano
C=O	1743.07	Carbonilo
C=C	1623.06	Alqueno
C-C	1457.96	Alcano
N-O	1367.71	Nitro
C-N	1151.15	Amina
C-O-C	1079.15	Celulosa
C-O	1020.55	Alcoholes primarios
C-H	860.91	Aromáticos
C-Cl	668.70	Haluros de alquilo

Por medio del espectro IR se pudo establecer los principales grupos funcionales activos de la semilla y cáscara de aguacate que intervienen en la adsorción de iones metálicos. Las bandas de absorción intensos y amplios alrededor de 3299 cm^{-1} corresponden a vibraciones de estiramiento de enlace -OH de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos, los cuales están presentes en la pectina, celulosa y lignina (Gnanasambandam & Proctor, 2000). Las bandas de 2926 y 2854 cm^{-1} se atribuyen a vibraciones de estiramiento de enlace C-H del grupo metil, metileno y grupos metoxi. La banda a 1743 cm^{-1} en los espectros muestra la vibración de estiramiento del enlace C=O del grupo carbonilo presentes en los grupos carboxilo de la pectina, hemicelulosa y lignina (Olorundare et al., 2012). Las bandas alrededor de 1623 cm^{-1} corresponde al estiramiento del enlace C=C puede atribuirse a la presencia lípidos, ácidos grasos y restos de lignina. También se describen bandas en la región de 1457 cm^{-1} y 1020 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones C-C, N-O, C-N, C-O-C y C-O (Massimi et al., 2018).

En resumen el biosorbente poseen una amplia cantidad de grupos funcionales, como grupos hidroxilo, alifáticos, fenólicos, metoxilo y carbonilo. Estos

grupos funcionales tienen la capacidad de interactuar con iones metálicos mediante la donación de pares de electrones del oxígeno, lo que permite la formación de complejos estables (Sánchez-Silva et al., 2020)

6.2. PORCENTAJE DE BIOSORCIÓN

Las condiciones experimentales en todos los análisis se realizaron por triplicado con un tamaño de partícula de 600 μm , pH 6, tiempo de contacto de 30 minutos y 1 g de biosorbente a una temperatura de 22 $^{\circ}\text{C}$.

Para determinar la concentración adsorbida por el biosorbente de semilla y cáscara de aguacate, se elaboró curvas de calibración de cadmio y mercurio, para evaluar la exactitud y precisión del método analítico. Las curvas de calibración obtenida garantizan resultados precisos y exactos, considerando que el coeficiente de correlación obtenido fue mayor a 0,995 para ambos casos

6.2.1. CADMIO

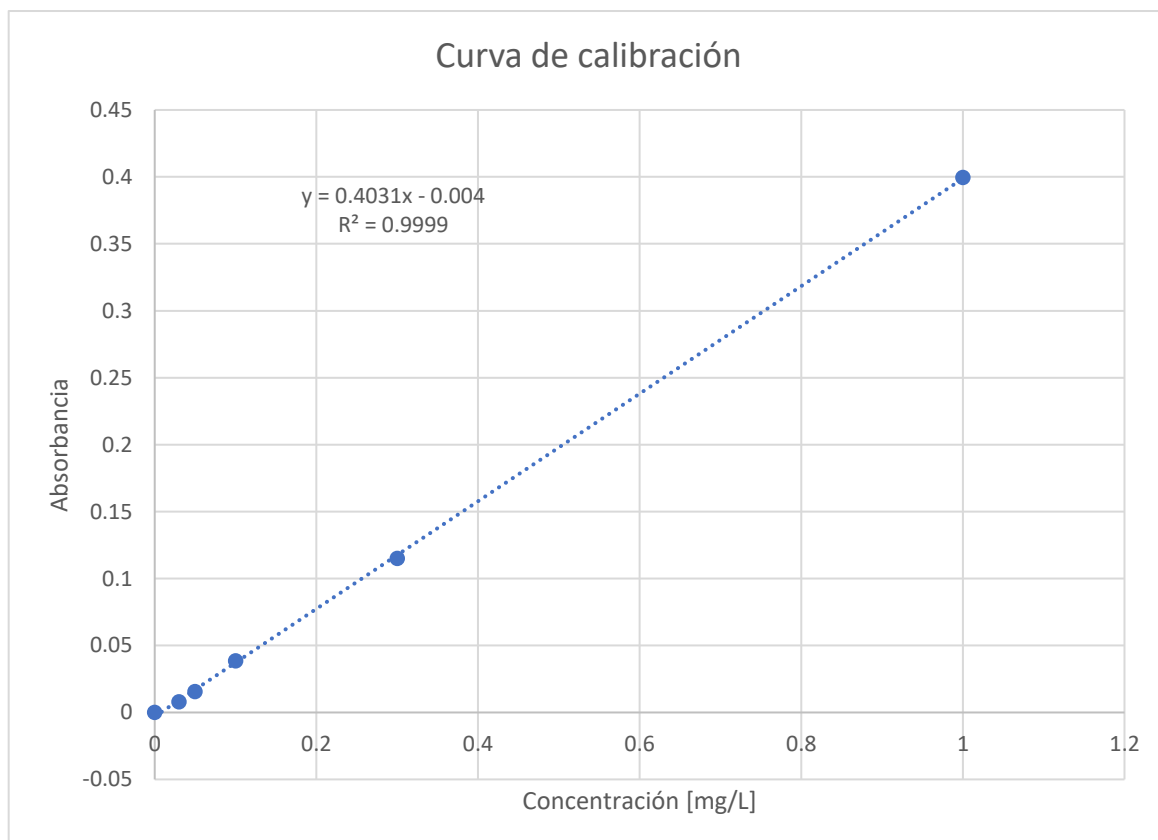


Figura 4. Curva de calibración de cadmio obtenida en el equipo de FAAS

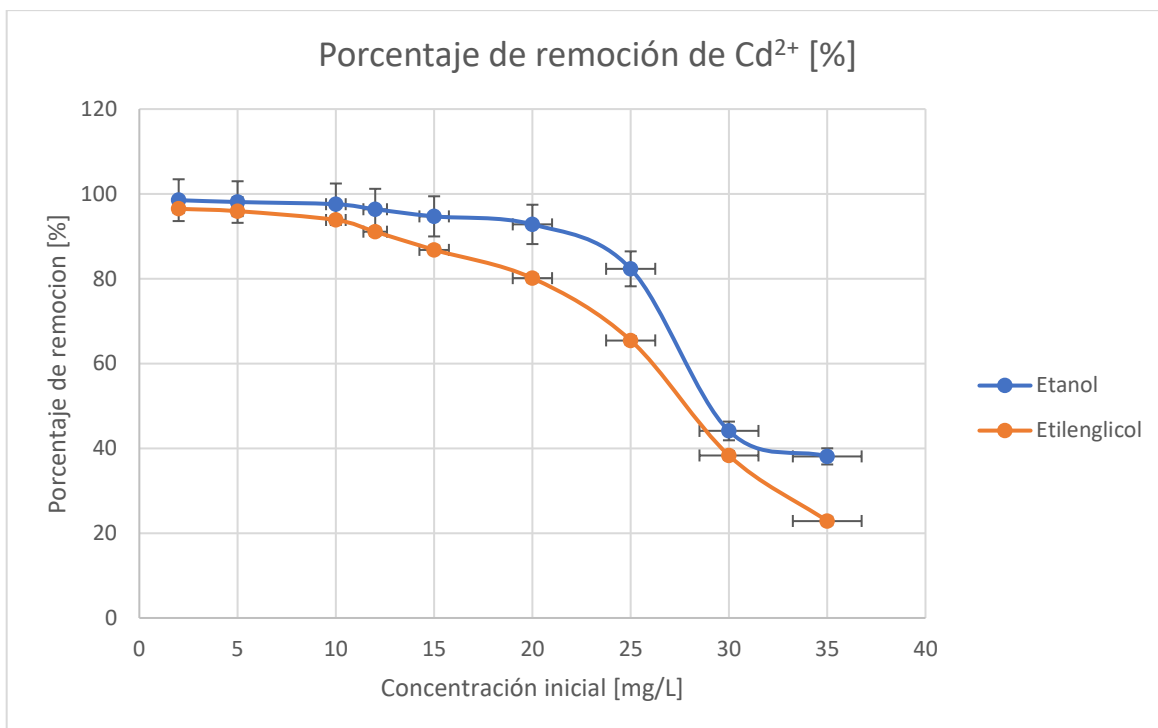


Figura 5. Grafica porcentaje de remoción de Cd²⁺ con diferentes lavados

En la Figura 5 se puede evidenciar que el porcentaje de remoción de Cd²⁺ en ambos casos de lavados son similares, disminuyendo con el aumento de la concentración inicial del metal. La adsorción máxima para el biosorbente lavado con etanol fue de 98.52 % y disminuyó gradualmente a 38,1 % de 2 a 35 mg/L⁻¹. Sin embargo la adsorción máxima para el biosorbente lavado con etilenglicol fue de 96.48 % y disminuyó gradualmente a 22.87% en las mismas concentraciones.

6.2.2. MERCURIO

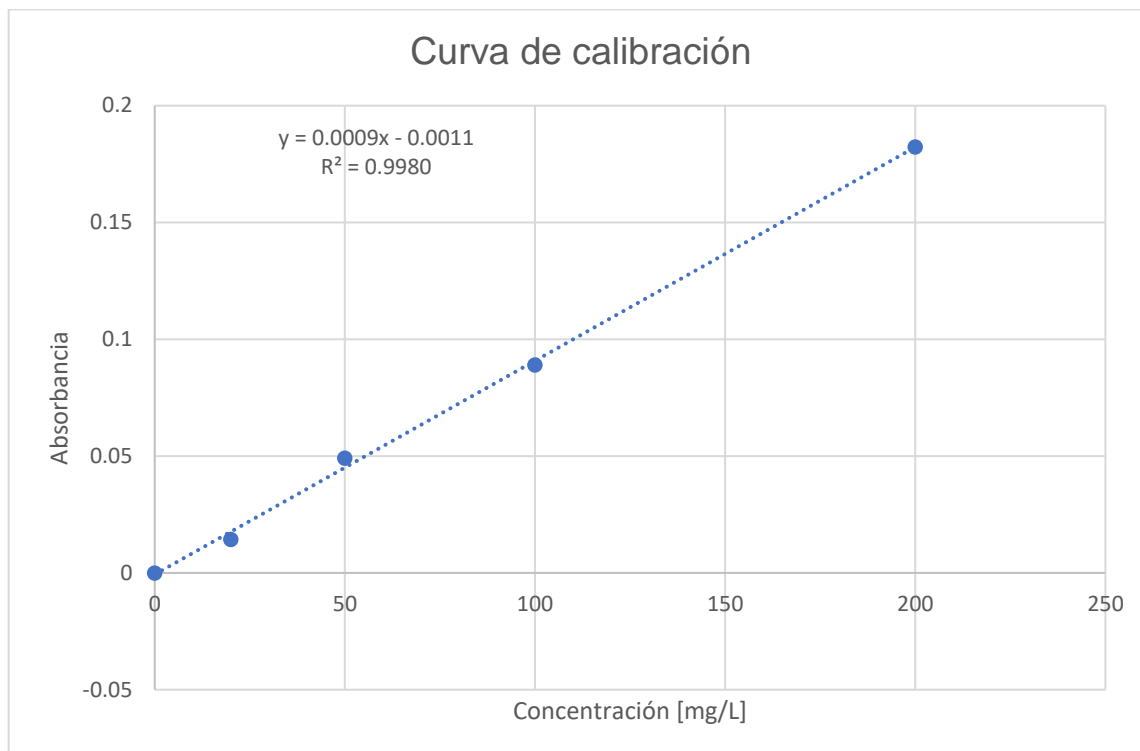


Figura 6. Curva de calibración de mercurio obtenida en el equipo de FAAS

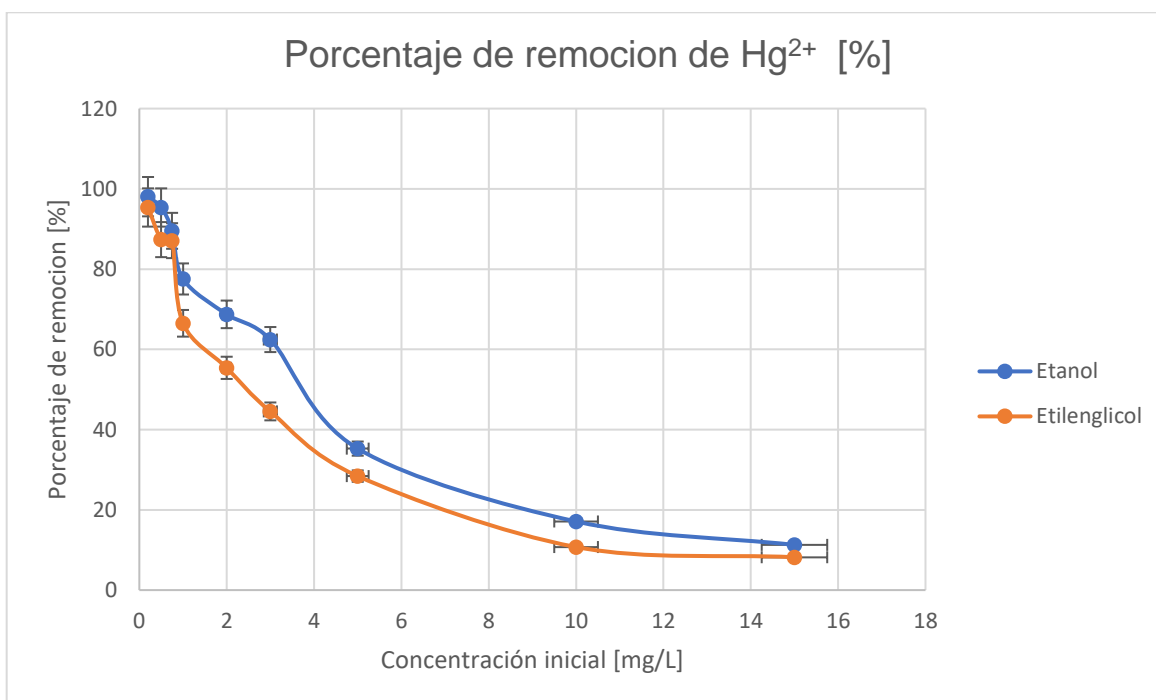


Figura 7. Grafica porcentaje de remoción de Hg^{2+} con diferentes lavados

De igual manera en la Figura 7 se puede evidenciar que el porcentaje de remoción de Hg^{2+} en ambos lavados son similares, al aumentar la concentración del metal, el porcentaje de adsorción disminuye significativamente. El porcentaje máximo de adsorción para el biosorbente lavado con etanol fue de 98.05 % y disminuyó gradualmente a 11,07 % de 0.2 a 15 mg/L^{-1} . Por otro lado el porcentaje máximo de adsorción para el biosorbente lavado con etilenglicol fue de 95.35 % , disminuyendo a 8.19% en las mismas concentraciones.

La disminución en el porcentaje de adsorción tanto para cadmio como para mercurio se debe a la ausencia de sitios de unión activos en la superficie del adsorbente para captar más iones de cadmio(II) en la solución. Esto implica que hubo un aumento de iones los cuales compiten por los sitios de unión disponibles en la superficie del adsorbente (Olasehinde et al., 2018)

Por otro lado, Sánchez-Silva et al (2020), menciona que la eficiencia del adsorbente aumenta a medida que se incrementa la concentración del metal, alcanzando un punto de concentración constante en el cual comienza a disminuir. Este fenómeno se atribuye a que la superficie disponible del adsorbente se vuelve más reducida debido a la adsorción de iones metálicos de Cd^{2+} en su superficie. Además, al tener una concentración de iones metálicos demasiado grande en la solución, la superficie se satura, lo que conlleva a una disminución o incluso una desorción del metal.

6.3. INFLUENCIA DEL PH EN LA CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN

Una vez desarrollada esta investigación se realizó pruebas para identificar el pH óptimo para la remoción de Cd^{2+} y Hg^{2+} . La concentración inicial planteada fue de 10 ppm con un tiempo de contacto de 30 minutos para los diferentes pH a una temperatura de $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.3.1. CADMIO

Para la remoción de Cd^{2+} mediante la cáscara y semilla de aguacate, se determinó que el pH óptimo para este proceso 5, como se puede observar en la tabla 11

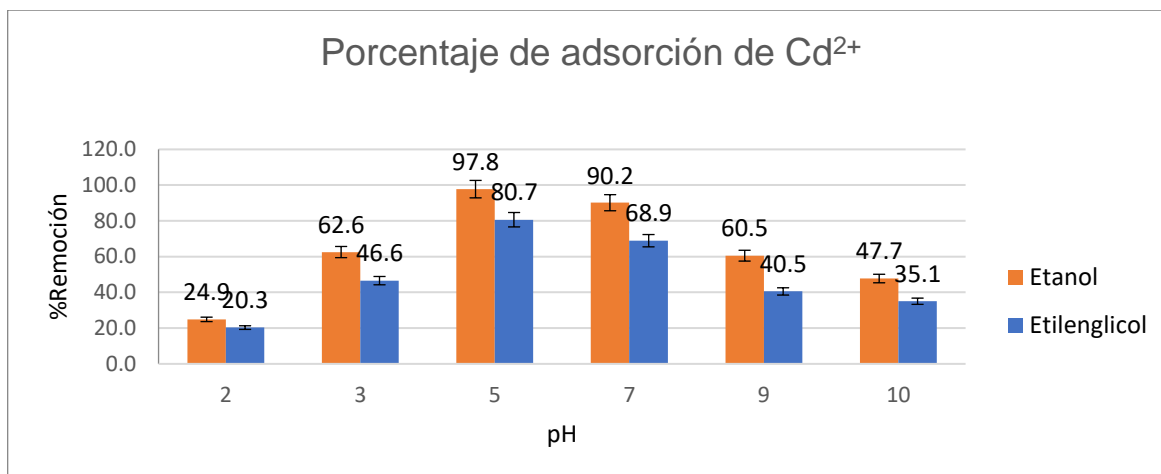


Figura 8. Efecto del pH en el porcentaje de adsorción de cadmio

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que el biosorbente tratado con etanol a un valor de pH 2, el porcentaje de ion metálico adsorbido es solamente del 24.9%. De igual manera se muestra que en el rango de pH de 2 a 5, ocurre un aumento progresivo del porcentaje de adsorción, siendo valores de pH 5 y 7 los que presentan un mejor rendimiento de adsorción. Sin embargo a partir de valores superiores a 7 el valor del porcentaje del ion metálico eliminado disminuye en 60.5%, 47.7% respectivamente. Por otro lado al tratarlo con etilenglicol se observa que posee un porcentaje de rendimiento menor en todos los pH en comparación con etanol, siendo el mayor de 80.7% a pH 5.

El efecto de la acidez de la solución es de suma importancia como menciona Muthuraman et al (2021), a pH bajos aumenta la fuerza iónica lo que produce una mayor competencia entre iones, lo que impide que el ion metálico se adsorba en la superficie del material. Por otro lado a pH muy elevados, se puede formar hidróxidos, esto reduce la tasa de adsorción y en consecuencia la capacidad de remoción.

De acuerdo con resultados obtenidos, se corrobora que el porcentaje de adsorción del Cd^{2+} baja al disminuir la acidez de la solución; ya que los iones hidronios compiten con los iones Cd^{2+} por los sitios activos presentes en el biosorbente y a medida que aumenta a pH 5-7 los iones Cd^{2+} tiene mayor afinidad y posibilidad de ser adsorbidos por lo cual se utiliza ese pH para los siguientes ensayos.

En el trabajo realizado por Muthuraman et al (2021), dio a conocer que la mayor remoción de Cd^{2+} fue a un pH de 5-7 utilizando polvo de semilla de aguacate. También Krishnan & Anirudhan (2003), obtiene una buena remoción a pH 4-5 al usar carbón proveniente de la caña de azúcar. Se puede evidencia que el porcentaje de adsorción varía dependiendo el biosorbente y el pH.

6.3.2. MERCURIO

Para la remoción de Hg^{2+} mediante la cáscara y semilla de aguacate, se determinó que el pH óptimo para este proceso es 5, como se puede observar en la tabla 12

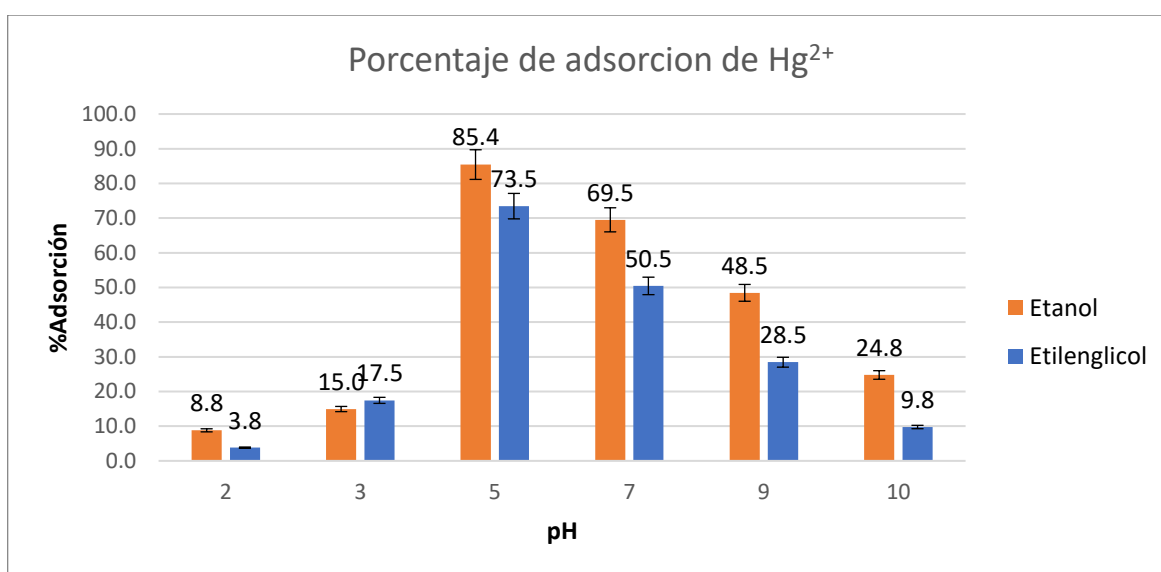


Figura 9. Efecto del pH en el porcentaje de adsorción de mercurio

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que el biosorbente tratado con etanol a un valor de pH 2-3, el porcentaje de ion metálico adsorbido es 8.8% y 15% respectivamente, se observa que a valores bajos de pH, la capacidad de remoción disminuye considerablemente, lo cual podría atribuirse a la posible protonación de los sitios activos del biosorbente, esto impedirá la adsorción del metal debido a la competencia con los protones presentes en un medio ácido. De igual manera se muestra que en el rango de pH de 2 a 5, existe un aumento progresivo del porcentaje de adsorción, siendo el pH 5 el que presenta mayor adsorción, seguido del pH 7.

Cuando se reduce la concentración de H^+ , mientras se mantiene manteniendo constante la concentración de Hg^{2+} , se observa un aumento en la remoción del metal. Esto se debe a la disminución de la competencia con los iones H^+ por los sitios de adsorción del biosorbente, siendo el pH 5 el de mayor porcentaje de remoción. Sin embargo pH superiores a 5 decrece la capacidad de adsorción debido a que el ion Hg^{2+} no es estable en disolución a pH superiores a la neutralidad.

Por otro lado al tratarlo con etilenglicol se observa que posee un porcentaje de menor rendimiento en todos los pH en comparación con etanol, siendo el mayor de 73,5 % a pH 5.

De acuerdo con resultados obtenidos, se corrobora que el porcentaje de adsorción del Hg^{2+} baja al disminuir la acidez de la solución; ya que los iones hidronios compiten con los iones del metal por los sitios activos presentes en el biosorbente.

Sánchez & Cameselle (2016) , en su estudio “Biosorción de mercurio (Hg^{2+}) usando materiales solidos residuales como adsorbentes” menciona que el serrín de pino y eucalipto, la caña de azúcar y la cáscara de huevo dieron lugar a resultados limitados de adsorción con un porcentaje de 50% , en comparación al tallo de maíz, café molido y césped cortado los cuales presentaron porcentajes de adsorción superiores al 80%. Por lo cual los resultados obtenidos en laboratorio concuerdan con la literatura.

Por otro lado, en el trabajo realizado por Peña Contreras (2020), se demostró el mayor porcentaje de remoción de mercurio es con biosorbente de cáscara de *Solanum tuberosum* pH 9 con un 93% de remoción, sin embargo esto puede deberse a que se realizó una reticulación del biosorbente con NaOH.

6.4. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Se realizaron isotermas de adsorción para comprender el proceso de adsorción de iones metálicos de cadmio y mercurio en el biosorbente, los cuales describen la relación entre la concentración del metal en la fase líquida y la cantidad adsorbidos en la superficie. Esto nos dará una mayor visión para determinar si se trata de un proceso de quimisorción o fisorción.

6.4.1. CADMIO

Para calcular las isotermas mediante modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich se realizó la linealización de los respectivos modelos.

Tabla 9. Parámetro modelo de Langmuir y Freundlich para cadmio

Solvente de lavado	Masa [g]	Ci [mg/L]	Ce [mg/L]	Langmuir		Freundlich	
				q [mg/g]	Ce/q	Log (Ce)	Log (q)
Etilenglicol	1.0008	2	0.417	39.543	0.011	-0.380	1.597
	1.0013	5	1.165	95.759	0.012	0.066	1.981
	1.0024	10	1.741	205.981	0.008	0.241	2.314
	1.0005	12	2.432	239.072	0.010	0.386	2.379
	1.0007	15	3.234	293.944	0.011	0.510	2.468
	1.0008	20	4.651	383.410	0.012	0.668	2.584
	1.0006	25	5.497	487.274	0.011	0.740	2.688
	1.0006	30	8.830	528.933	0.017	0.946	2.723
	1.0008	35	28.110	172.112	0.163	1.449	2.236
Etanol	1.0009	2	0.030	49.206	0.001	-1.523	1.692
	1.0010	5	0.096	122.478	0.001	-1.018	2.088
	1.0021	10	0.243	243.414	0.001	-0.614	2.386
	1.0004	12	0.434	289.034	0.002	-0.363	2.461
	1.0008	15	0.795	354.841	0.002	-0.100	2.550
	1.0007	20	1.437	463.750	0.003	0.157	2.666
	1.0032	25	4.417	512.934	0.009	0.645	2.710
	1.0009	30	16.769	330.478	0.051	1.225	2.519
	1.0009	35	21.665	333.075	0.065	1.336	2.523

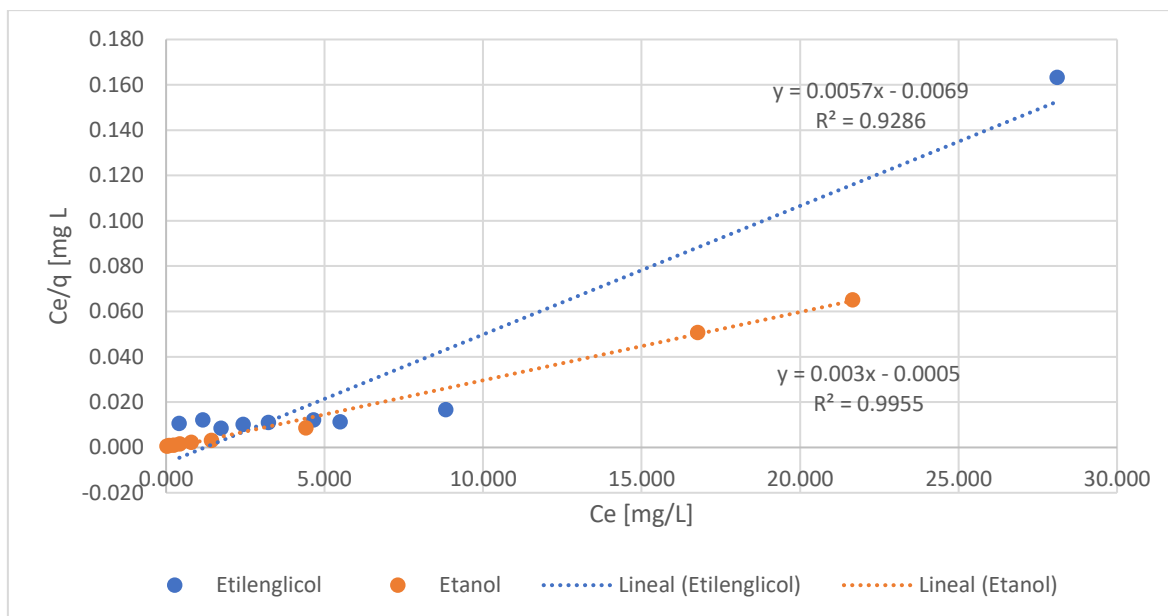


Figura 10. Isotherma de Langmuir para la adsorción de cadmio

Como se muestra en la Tabla 15 para el biosorbente lavado con etanol se obtuvo una recta con pendiente de 0.003 e intercepción 0.0005 dando como resultado un valor para K_L de 0.8261, una capacidad máxima de adsorción de 0.333mg/g y un valor de correlación R^2 de 0.995. Mientras que para el lavado etilenglicol se obtuvo una recta con pendiente de 0.0057 e intercepción 0.0069 dando como resultado un valor para K_L de 0.600 y una capacidad máxima de adsorción de 0.175 mg/g, con un valor de correlación R^2 de 0.9286.

Con los resultados obtenidos se afirma que la isoterma de Langmuir se ajusta bien al modelo para metal cadmio. Finalmente se determinó el patrón de equilibrio isotérmico R_L dando como resultado para etanol de 0.14 y etilenglicol 0.11. Como menciona Uría (2008), los valores de R_L que se encuentran en el rango de 0 a 1 presentan una adsorción favorable, aunque se aprecia una disminución en la cantidad adsorbida mientras se aumenta la concentración de iones de cadmio.

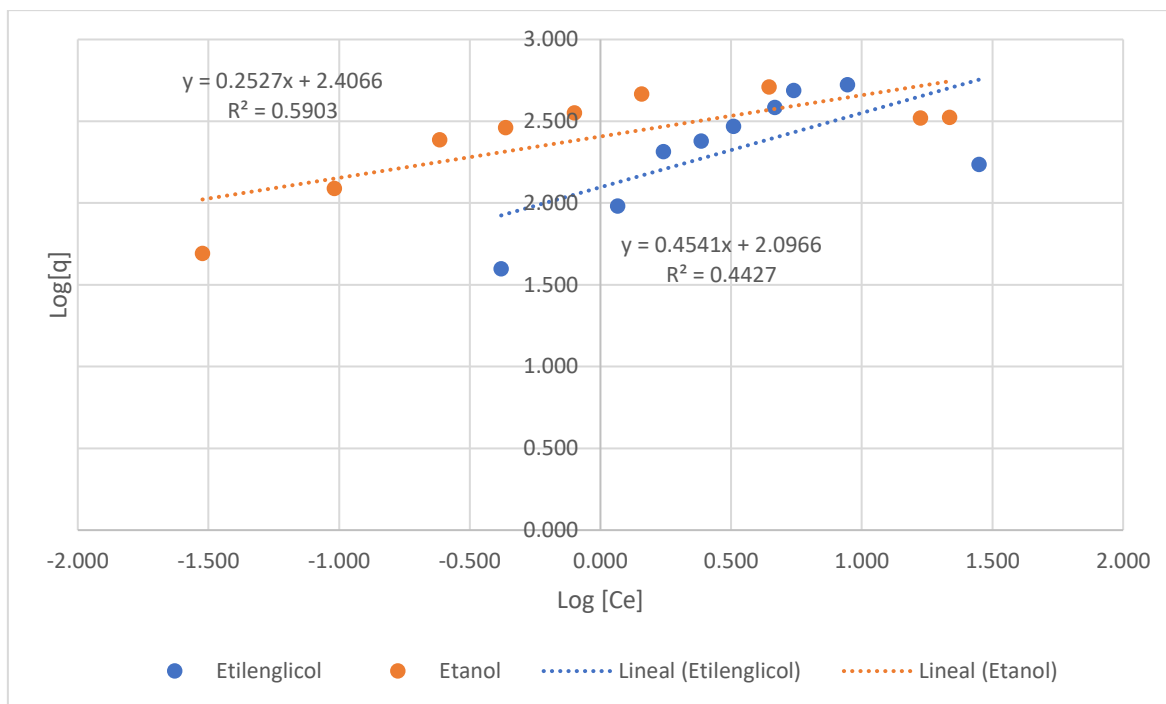


Figura 11. Isotherma de Freundlich para la adsorción de cadmio

Para la isoterma de Freundlich se obtuvo un constante K_F de 0.255 con una relación R^2 de 0.5903 y constante de intensidad de adsorción (n) de 3.9572 de para el biosorbente lavado con etanol. Mientras que se obtuvo un K_F de 0.124 con un R^2 de 0.442 y constante de intensidad de adsorción (n) de 2.2021 para el biosorbente lavado con etilenglicol.

Estudios semejantes se han llevado a cabo con buenos resultados en la remoción de cadmio mediante distintos biosorbente como se muestra en la Tabla 15 . Dichos resultados indican que la semilla y cáscara de aguacate es una buena opción para la remoción de iones cadmio.

Tabla 10. Capacidad máxima de adsorción de Cd^{2+} en distintos biosorbente.

Biomasa	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)	Referencia
Cáscara de plátano	0.271	(Al-Qahtani, 2016)
Hueso de olivo	0.739	(Fiol et al., 2006)
Vástago de trigo	5.601	(Tan & Xiao, 2009)

6.4.2. MERCURIO

Tabla 11. Parámetro modelo de Langmuir y Freundlich para mercurio

Solvente de lavado	Masa [g]	Ci [mg/L]	Ce [mg/L]	Langmuir		Freundlich	
				q [mg/g]	Ce/q	Log (Ce)	Log (q)
Etanol	1.0019	0.2	0.004	4.891	0.001	-2.398	0.689
	1.0016	0.5	0.023	11.906	0.002	-1.638	1.076
	1.0019	0.75	0.078	16.768	0.005	-1.108	1.224
	1.0015	1	0.225	19.346	0.012	-0.648	1.287
	1.0007	2	0.626	34.326	0.018	-0.203	1.536
	1.0015	3	1.127	46.755	0.024	0.052	1.670
	1.0000	5	3.237	44.075	0.073	0.510	1.644
	1.0010	10	8.29	42.707	0.194	0.919	1.631
	1.0010	15	13.309	42.233	0.315	1.124	1.626
Etilenglicol	1.0019	0.2	0.009	4.760	0.002	-2.035	0.678
	1.0016	0.5	0.063	10.901	0.006	-1.199	1.037
	1.0019	0.75	0.097	16.298	0.006	-1.014	1.212
	1.0015	1	0.335	16.598	0.020	-0.475	1.220
	1.0008	2	0.892	27.673	0.032	-0.050	1.442
	1.0015	3	1.664	33.344	0.050	0.221	1.523
	1.0002	5	3.413	39.675	0.086	0.533	1.599
	1.0007	10	8.327	41.799	0.199	0.920	1.621
	1.0006	15	13.622	34.428	0.396	1.134	1.537

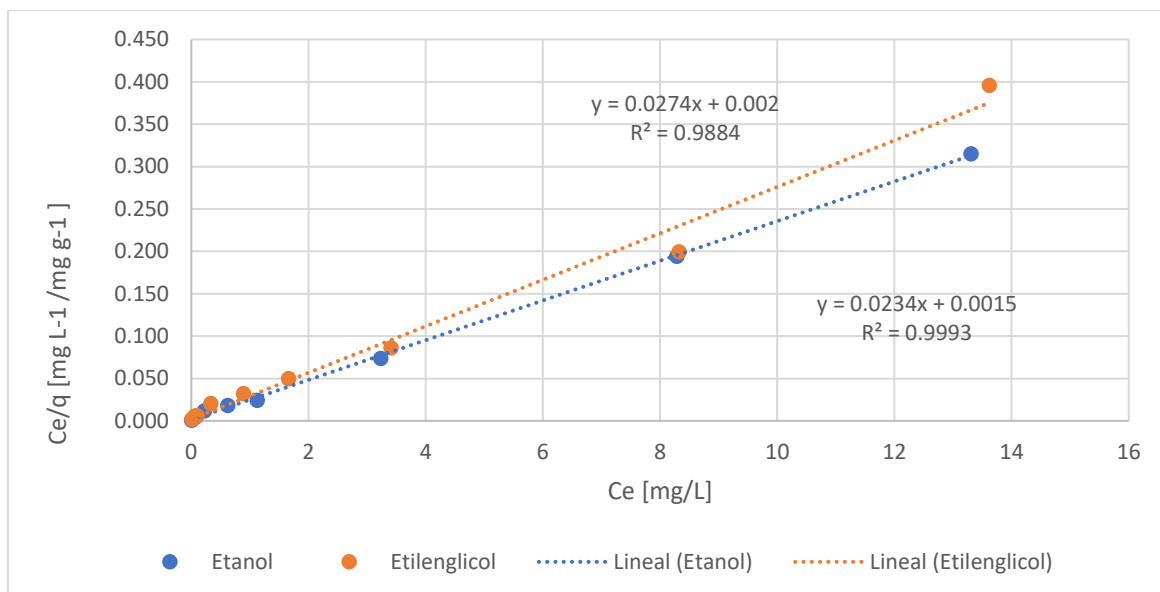


Figura 12. Isotherma de Langmuir para la adsorción de mercurio

En la Tabla 17 se puede observar que para el biosorbente con lavado de etanol se obtuvo una recta con pendiente de 0.023 e intercepción 0.0015 dando como resultado un valor para K_L de 15.24, una capacidad máxima de adsorción de 0.042 mg/g y un valor de correlación R^2 de 0.999. Por otro lado para el lavado con etilenglicol se obtuvo una recta con pendiente de 0.0274 e intercepción 0.002 dando como resultado un valor para K_L de 13.70, una capacidad máxima de adsorción de 0.175 mg/g y un valor de correlación R^2 de 0.9884. De igual manera dicha isoterma de Langmuir se ajusta bien al modelo para metal mercurio. Finalmente con los datos obtenidos se determinó el patrón de equilibrio isotérmico R_L dando como resultado para etanol de 0.07 y etilenglicol 0.06.

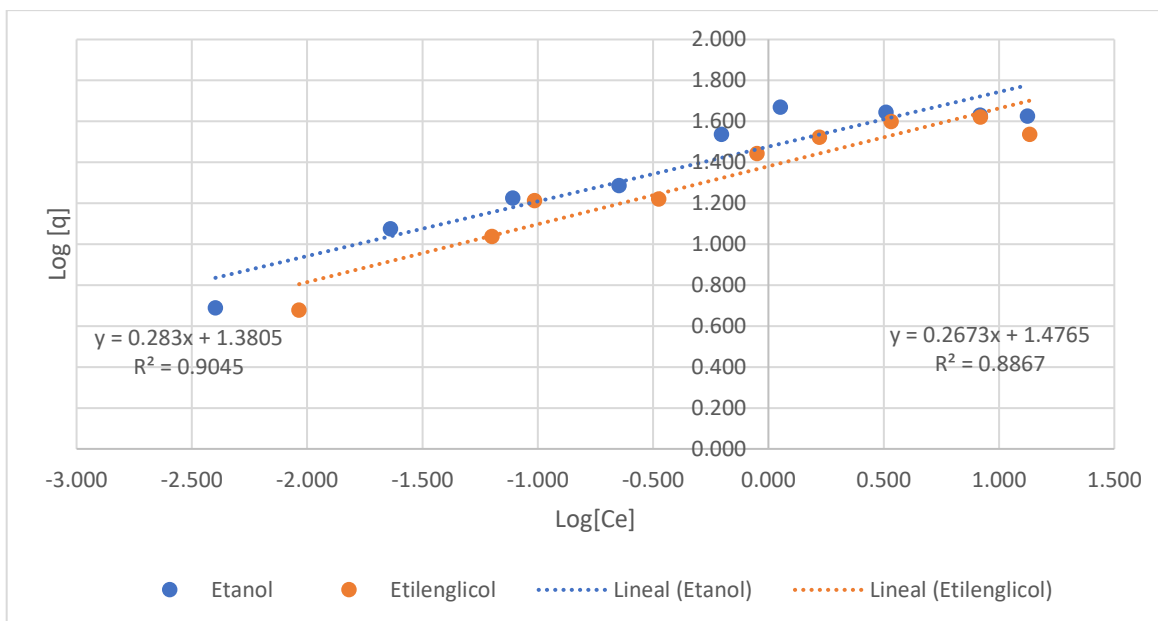


Figura 13. Isoterma de Freundlich para la adsorción de mercurio.

Se determinó el valor de la concentración máxima usando la isoterma de Freundlich. El valor obtenido de la constante K_F fue 29.95 con una relación R^2 de 0.9045 e intensidad (n) de 3.74 de para etanol. Mientras que se obtuvo un K_F de 24.01 con un R^2 de 0.886 y una constante de intensidad de adsorción (n) de 3.53 para etilenglicol. Entre las investigaciones enfocadas a la adsorción de mercurio se encontró la realizada por los distintos autores en la Tabla 20.

Tabla 12 .Capacidad máxima de adsorción de Hg^{2+} en distintos biosorbente.

Biomasa	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)	Referencia
Cáscara de mandarina	0.024	(Husein, 2013)
Bagazo de caña de azúcar	0.173	(Khoramzadeh et al., 2013)
Paja de arroz	3.496	(Rocha et al., 2009)

Al comparar los valores del coeficiente de relación en las isothermas de Langmuir con los obtenidos en las isothermas de Freundlich, podemos observar que para ambos procesos realizado con biomasa tratada con etilenglicol y etanol, los coeficientes de correlación en la isoterma de Langmuir son mayores, por lo cual se puede inferir que el proceso se rige bajo dicha isoterma y se asume que la adsorción ocurre en una sola capa sobre la superficie del adsorbente y no existe interacciones entre las moléculas adsorbidas. También describe la adsorción en sistemas donde la superficie del adsorbente es uniforme y se alcanza una saturación completa.

Además, se afirma que tanto para cadmio como para mercurio, el modelo de Langmuir es el que mejor reproduce los resultados experimentales. Por otro lado, se asume que la adsorción ocurre en sitios específicos del adsorbente y que cada proceso de adsorción tiene una energía homogénea, lo que significa que todos los sitios de adsorción tienen la misma energía de interacción con la especie que se está adsorbiendo; además, no hay interacciones entre las moléculas adsorbidas (Astudillo et al., 2019) .

7.CONCLUSIONES

Se observó una buena capacidad de adsorción del biosorbente, lo que indica su potencial como una alternativa viable y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con iones metálicos Cd^{2+} y Hg^{2+} .

Se ha demostrado que las columnas a microescala elaboradas a base de 1 g residuo de semilla y cáscara de aguacate *Persea americana* Hass, poseen la capacidad de adsorber iones metálicos de cadmio y mercurio, aceptando la idea de investigación.

Los resultados indican que las columnas a microescala presentan una buena capacidad de adsorción de iones metálicos. Sin embargo esto dependen en gran medida de la concentración inicial del metal. Los porcentajes obtenidos fueron mayores a 38% para cadmio y mayores a 11% para mercurio.

El modelo matemático usado en la investigación se basó en las isothermas de Langmuir y Freundlich demostrando una capacidad de adsorción máxima de cadmio por parte del biosorbente de 0.3 mg/g con una correlación de 0.99 y constante K_L de 0.82 , mientras que para mercurio la capacidad máxima de adsorción fue de 0.04 mg/g , concluyendo que el biosorbente posee una mayor relación de afinidad por lo iones de cadmio que por los iones mercurio.

Se determinó que el pH óptimo para una mejor adsorción de cadmio y mercurio es el biosorbente lavado con etanol a un pH de 5 para ambos casos, alcanzado un porcentaje de adsorción de 97.8% a una concentración de metal de 10 mg/L para cadmio y un porcentaje de adsorción 85.4% a una concentración del metal de 2 mg/L.

8.RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis de microscopía electrónica de barrido e infrarrojo al biosorbente antes y después de realizar los procesos de adsorción del metal de interés, para observar cómo afecta los iones a la composición del mismo.

Se aconseja realizar un nuevo estudio similar al actual, con la diferencia que se aplique un tratamiento químico en el biosorbente, ya sea con ácidos o bases, para evaluar si la adsorción de iones metálicos aumenta.

Se recomienda realizar estudios con distintos tamaños de partícula y con volúmenes mayores de biosorbente y de soluciones del biosorbente con el fin de evaluar su influencia en el proceso de adsorción.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agouborde Lina. (2008). *Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales*. (Tesis de maestría). Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.
- Aiyesanmi, A. F., Adebayo, M. A., & Arowojobe, Y. (2020). Biosorption of Lead and Cadmium from Aqueous Solution in Single and Binary Systems Using Avocado Pear Exocarp: Effects of Competing Ions. *Analytical Letters*, 53(18), 2868–2885. <https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1760294>
- Alvarez Joel. (2018). ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE AGUACATE EN EL ECUADOR Y SU EXPORTACIÓN A MERCADOS INTERNACIONALES. <https://orcid.org/0000-0003-4605-3709>
- Araújo, R. G., Rodriguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Pintado, M. M. E., & Aguilar, C. N. (2018). Avocado by-products: Nutritional and functional properties. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 80, pp. 51–60). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.027>
- Astudillo, S., Vera, L., Astudillo, J., & Castro, C. (2019). Evaluation of the biosorbent power of corn leaf in the removal of heavy metal. *Afinidad*, 77(591).
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. In *Frontiers in Pharmacology* (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- Bermejo Daniel. (2016). *"REMOCIÓN DE PLOMO Y CADMIO PRESENTE EN AGUAS*. (Disertación de pregrado). Universidad de Cuenca, Quito, Ecuador.
- Bernal E., J. A., Diaz Diez, C. Arturo., Tamayo V., Alvaro., Cordoba G., O. de J., & Londoño Z., M. E. (2008). *Tecnología para el cultivo del aguacate*. Corpoica (Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria).
- Cabrera Luis. (2017). *BIOADSORCIÓN DE IONES DE PLOMO Y CROMO PROCEDENTES DE AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO LA CÁSCARA DEL TOMATE DE ÁRBOL (SOLANUM BETACEUM)*". (Disertación de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Cardona, A., Vargas, D., & Zepeda, A. (2013). *Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II)*. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (Eds.). (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation - the prospects for practical applications. In *Environment International* (Vol. 36, Issue 3, pp. 299–307). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.001>

- Colón Velásquez-López, P., Yadira López Sánchez, I., María, Y., & Rivera Velásquez, F. (2020). Estimación del riesgo ecológico y a la salud humana del mercurio en una zona de manglar del estuario La Puntilla, El Oro, Ecuador. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 49(1), 81–100.
- Cordova Cynthia. (2016). *BIOSORCIÓN DE Pb²⁺ Y Cd²⁺ EN SOLUCIÓN BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE LABORATORIO USANDO LA MACRÓFITA ACUÁTICA Typha latifolia INERTE*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Santiago de Querétaro, México.
- Coronel, V. (2017). *"BIOSORCIÓN DE CIPROFLOXACINA CON BAGAZO DE CAÑA Y MAZORCA DE MAIZ EN TANQUE AGITADO*.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 17, Issue 1, pp. 145–155). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Demers, J. D., Blum, J. D., & Zak, D. R. (2013). Mercury isotopes in a forested ecosystem: Implications for air-surface exchange dynamics and the global mercury cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 222–238. <https://doi.org/10.1002/gbc.20021>
- Domínguez, M. P., Araus, K., Bonert, P., Sánchez, F., San Miguel, G., & Toledo, M. (2014). *The Avocado and Its Waste: An Approach of Fuel Potential/Application* (pp. 199–223). https://doi.org/10.1007/978-94-007-698-2_9
- Dunay Sara. (2022). *Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados*. Universidad de Oriente, Cuba.
- Pérez Esmeralda, Isabel, M., & Cruz, A. (2012). Los efectos del cadmio en la salud Rev Esp Méd Quir Volumen 17, Núm. 3, julio-septiembre (Vol. 17, Issue 3). www.nietoeditores.com.mx
- Gnanasambandam, R., & Proctor, A. (2000). *Determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy*. www.elsevier.com/locate/foodchem
- Gómez, R., & Murillo, R. (2001). *ESPECTROSCOPIA INFRARROJA*.
- Husein, D. Z. (2013). Adsorption and removal of mercury ions from aqueous solution using raw and chemically modified Egyptian mandarin peel. *Desalination and Water Treatment*, 51(34–36), 6761–6769. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.801793>
- Idrees, N., Tabassum, B., Abd Allah, E. F., Hashem, A., Sarah, R., & Hashim, M. (2018). Groundwater contamination with cadmium concentrations in some West U.P. Regions, India. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(7), 1365–1368. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.07.005>
- INEN 1162. (20113). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1162:2013 Primera revisión*.

- Caviedes, Perdomo, Rodríguez, Javier, I., & Rojas, S. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. In *Revista Ingeniería y Región* (Vol. 13, Issue 1).
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Kammerer, J., Carle, R., & Kammerer, D. R. (2011). Adsorption and ion exchange: Basic principles and their application in food processing. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 59, Issue 1, pp. 22–42). <https://doi.org/10.1021/jf1032203>
- Khoramzadeh, E., Nasernejad, B., & Halladj, R. (2013). Mercury biosorption from aqueous solutions by Sugarcane Bagasse. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(2), 266–269. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.09.004>
- Krishnan, A., & Anirudhan, T. S. (2003). Removal of cadmium(II) from aqueous solutions by steam-activated sulphurised carbon prepared from sugar-cane bagasse pith: Kinetics and equilibrium studies. <http://www.wrc.org.za>
- Kumar Meena, A., Rajagopal, C., & Mishra, G. K. (2010). Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using chemically (Na₂S) treated granular activated carbon as an adsorbent. In *Journal of Scientific & Industrial Research* (Vol. 69). <https://www.researchgate.net/publication/279903931>
- Vera Luisa ., María, U., Nancy, G., Maritza, F., & Verónica, V. (2015). Heavy metals removal from mining wastewater using bagasse as. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Malkoc, E., & Nuhoglu, Y. (2006). Removal of Ni(II) ions from aqueous solutions using waste of tea factory: Adsorption on a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1–3), 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.070>
- Massimi, L., Giuliano, A., Astolfi, M. L., Congedo, R., Masotti, A., & Canepari, S. (2018). Efficiency evaluation of food waste materials for the removal of metals and metalloids from complex multi-element solutions. *Materials*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/ma11030334>
- Mendoza, L. V., & Fuentes Molina, N. (2014). IOSORCIÓN DE Cd, Pb y Zn POR BIOMASA PRETRATADA DE ALGAS ROJAS, CÁSCARA DE NARANJA Y TUNA. In *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (Vol. 25, Issue 1).
- Muthuraman, R. M., Murugappan, A., & Soundharajan, B. (2021). A sustainable material for removal of heavy metals from water: Adsorption of cd(ii), pb(ii), and cu(ii) using kinetic mechanism. *Desalination and Water Treatment*, 220, 192–198. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27002>
- Navarro-Aviñó, J., Aguilar Alonso, I., & López-Moya, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=488>

- Olasehinde, E. F., Adegunloye, A. V., Adebayo, M. A., & Oshodi, A. A. (2018). Sequestration of Aqueous Lead(II) Using Modified and Unmodified Red Onion Skin. *Analytical Letters*, 51(17), 2708–2730. <https://doi.org/10.1080/00032719.2018.1448989>
- Olorundare, O. F., Krause, R. W. M., Okonkwo, J. O., & Mamba, B. B. (2012). Potential application of activated carbon from maize tassel for the removal of heavy metals in water. *Physics and Chemistry of the Earth*, 50–52, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2012.06.001>
- Ordóñez Alejandra. (2017). *DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA PAPA PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Oyeyemi. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 38–45. <https://doi.org/10.9790/5736-0313845>
- Peña Contreras. (2020). *ADSORCION DE Hg Y Cu POR CÁSCARA DE Solanum tuberosum L. EN AGUA DE RELAVE DE LA MINERÍA DE LA LOCALIDAD DE SECOCHA-CAMANÁ-AREQUIPA*. Universidad Nacional de San Antonio Abad, Cusco, Peru.
- PerkinElmer. (2007). *AAAnalyst 400 AA Spectrometer Control and Data System User Interface Complete PC control of all functions of the AAAnalyst™ 400 using WinLab32™ for AA software. WinLab32 for AA includes an innovative user interface that makes the.* www.perkinelmer.com
- Pintado, K. (2018). *COMPARACIÓN DE LA BIOSORCIÓN Y DESORCIÓN DE METALES PESADOS MEDIANTE EL USO DE MARLO DE MAÍZ (Zea mays) EN AGUAS CONTAMINADAS*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Rafique, S., Shaista Gillani, S., & Nazir, R. (2021). *Lead and Cadmium Toxic Effects on Human Health: A Review*.
- Rocha, C. G., Zaia, D. A. M., Alfaya, R. V. da S., & Alfaya, A. A. da S. (2009). 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.074>
- Sánchez, J., & Cameselle, C. (2016). *Biosorción de mercurio (Hg²⁺) usando materiales sólidos residuales como adsorbentes*. Universidad de Vigo, España.
- Sanchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J., & Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 23. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>

- Sayqal, A., & Ahmed, O. B. (2021). Advances in Heavy Metal Bioremediation: An Overview. In *Applied Bionics and Biomechanics* (Vol. 2021). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/1609149>
- Tamay Crespo, A. P. (2019). *Determinación de la capacidad de biosorción y desorción de la corona de piña (Ananas comosus) para la remoción de metales pesados (Bachelor's thesis)*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *EXS* (Vol. 101, pp. 133–164). https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123.
- Tesfaye, T., Ayele, M., Gibril, M., Ferede, E., Limeneh, D. Y., & Kong, F. (2022). Beneficiation of avocado processing industry by-product: A review on future prospect. In *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100253>
- TULSMA. (2015). *TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE*. www.lexis.com.ec
- Ugwu, E. I., Tursunov, O., Kodirov, D., Shaker, L. M., Al-Amiery, A. A., Yangibaeva, I., & Shavkarov, F. (2020). Adsorption mechanisms for heavy metal removal using low cost adsorbents: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 614(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012166>
- Uría Christian Larenas, A. D. (2008). *Estudio isotérmico de biosorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047392002>
- Vasco, Verónica. (2008). *DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE ZANAHORIA AMARILLA (Daucus carota)*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Vera, L., Uguña, M. F., García, N., Maritza, F., & Vázquez, V. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad*, 73(573).
- Verdugo, J. (2017). *Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la mandarina (citrus reticulata var. clementina)*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Wang, Q., Kim, D., Dionysiou, D. D., Sorial, G. A., & Timberlake, D. (2004). Sources and remediation for mercury contamination in aquatic systems - A literature review. *Environmental Pollution*, 131(2), 323–336. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.010>
- Wei, W., Wang, Q., Li, A., Yang, J., Ma, F., Pi, S., & Wu, D. (2016). Biosorption of Pb (II) from aqueous solution by extracellular polymeric substances extracted from

Klebsiella sp. J1: Adsorption behavior and mechanism assessment. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep31575>

Wilma Gallegos, M. V. (2012). ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON LLAMA Y SU APLICACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE PLOMO Y CONTROL DE PRODUCTOS COSMÉTICOS. *La Granja*, 15(1), 18–25. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047399003>

10. FIGURAS

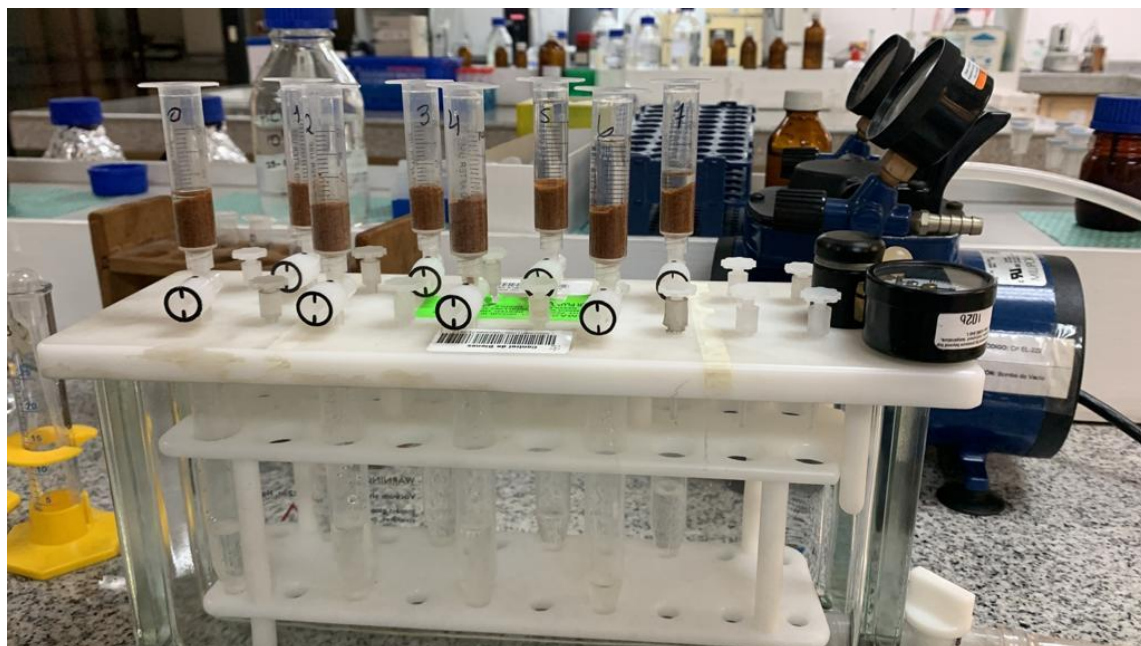


Figura 16. Columnas a microescala a base de semilla y cáscara de aguacate

11. ANEXOS

- Densidad real

	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	Desviación estándar
Densidad real (g/mL)	1.1224	0.8233	0.9418	0.151

$$\delta R = \frac{16.5325 - 16.0322}{0.5003 + 26.5741 - 26.6116} * 1$$

$$\delta R = 0.9625$$

- Densidad aparente

	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	Desviación estándar
Densidad aparente (g/mL)	0.3231	0.3044	0.2950	0.014

$$\delta A = \frac{2.006}{6.53}$$

$$\delta A = 0.3075$$

- Porosidad

	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	Desviación estándar
Porosidad	0.7121	0.6303	0.6867	0.0419

$$E = \frac{0.9625 - 0.3075}{0.9625}$$

$$E = 0.6805$$

- Ceniza

	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	Desviación estándar
Cenizas totales(%)	3.824	2.611	2.857	0.642

$$\% \text{ Cenizas} = \left[\frac{(70.5440 - 70.45109)}{3.001} \right] * 100$$

$$\% \text{ Cenizas} = 3.097$$

- Humedad

	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3	Desviación estándar
Cenizas totales(%)	7.811	7.716	7.761	0.047

$$\%H = \frac{(49.896 - 49.741) * 100}{2.002}$$

$$\%H = 7.76$$

Tabla 13. Datos obtenidos en el estudio de porcentaje de remoción de cadmio.

Solvente de lavado	Concentración Cd ²⁺ inicial [mg/L]	Concentración Cd ²⁺ final [mg/L]	Remoción %	Desviación estándar	CV
Etanol	2	0.030	98.52	0.0278	0.0283
	5	0.096	98.08	0.0400	0.0408
	10	0.243	97.57	0.1155	0.0183
	12	0.434	96.38	0.1494	0.1550
	15	0.795	94.7	0.0778	0.0822
	20	1.437	92.81	0.2088	0.050
	25	4.417	82.33	0.0961	0.1167
	30	16.769	44.1	1.9453	4.4110
	35	21.665	38.1	1.4296	3.7522
Etilenglicol	2	0.04	96.48	0.0785	0.0801
	5	0.203	95.93	0.0237	0.0247
	10	0.615	93.85	0.2252	0.2399
	12	1.069	91.09	0.4282	0.4701
	15	1.979	86.8	0.1700	0.1959
	20	3.973	80.13	0.3552	0.0433
	25	8.636	65.45	0.2656	0.0585
	30	20.42	38.32	2.5922	6.7645
	35	26.995	22.87	0.5673	2.4804

Tabla 14. Datos obtenidos en el estudio de remoción de mercurio

Solvente de lavado	Concentración		Remoción %	Desviación estándar	CV
	Hg ²⁺ inicial [mg/L]	Hg ²⁺ final [mg/L]			
Etanol	0.2	0.004	98.05	0.1625	0.1657
	0.5	0.023	95.35	0.6231	0.6535
	0.75	0.078	89.54	0.6160	0.6879
	1	0.225	77.54	5.7750	1.4477
	2	0.626	68.72	4.8347	1.0354
	3	1.127	62.44	0.5149	0.8247
	5	3.237	35.26	4.9386	2.0062
	10	8.290	17.1	0.1935	1.1316
	15	13.309	11.27	9.1479	6.1704
Etilenglicol	0.2	0.009	95.35	0.1688	0.1770
	0.5	0.063	87.35	0.6231	0.7133
	0.75	0.097	87.09	0.5604	0.6434
	1	0.335	66.49	5.3242	3.0075
	2	0.892	55.39	1.2732	2.2986
	3	1.664	44.53	7.0889	0.9194
	5	3.413	28.41	9.9964	2.0254
	10	8.327	10.73	5.7599	0.4286
	15	13.622	8.19	7.8789	5.7330

Tabla 15. Resultado experimental del pH óptimo para remoción de cadmio

Solvente de lavado	pH	Conc. inicial (ppm)	Cantidad final de Cd ²⁺	
			en el agua en ppm (promedio)	Remoción(%)
Etanol	2	10	5.97	25.3
	3	10	3.744	62.6
	5	10	0.225	97.8

	7	10	0.984	90.2
	9	10	3.946	60.5
	10	10	4.995	50.1
Etilenglicol	2	10	7.97	20.3
	3	10	5.344	46.6
	5	10	1.935	80.7
	7	10	3.109	68.9
	9	10	5.946	40.5
	10	10	6.495	35.1

Tabla 16 . Resultado experimental del pH óptimo para remoción de mercurio

Solvente de lavado	pH	Conc. inicial (ppm)	Cantidad final de Hg ²⁺	
			en el agua en ppm (promedio)	Remoción(%)
Etanol	2	2	1.824	8.8
	3	2	1.701	15
	5	2	0.291	85.4
	7	2	0.61	69.5
	9	2	1.031	48.5
	10	2	1.505	24.8
	Etilenglicol	2	2	1.924
3		2	1.651	17.5
5		2	0.531	73.5
7		2	0.991	50.5
9		2	1.431	28.5
10		2	1.805	9.8

Tabla 17. Parámetros isotérmicos para el proceso de adsorción de cadmio.

Solvente de lavado	Langmuir				Freundlich		
	K_L [L/mg]	q_{max} [mg/g]	R_L	R^2	K_F	n	R^2
Etilenglicol	0.600	0.175	0.11	0.9286	0.124	2.2021	0.4427
Etanol	0.8261	0.333	0.14	0.9955	0.255	3.9572	0.5903

Tabla 18. Parámetros isotérmicos para el proceso de adsorción de mercurio.

Solvente de lavado	Langmuir				Freundlich		
	K_L [L/mg]	q_{max} [mg/g]	R_L	R^2	K_F	n	R^2
Etanol	15.2433	0.042	0.07	0.9993	29.9571	3.7411	0.8867
Etilenglicol	13.7023	0.036	0.06	0.9884	24.0159	3.5335	0.9045