



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**Evaluación de la capacidad bioadsorbente de columnas elaboradas a partir de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.) para Plomo (Pb) y Níquel (Ni)**

**Disertación previa a la obtención del título de Química**

**CRISTINA BELÉN MAYORGA NARANJO**

**Quito – Ecuador**

**2022**

## CERTIFICACIÓN

Yo, Julio César Vinueza Galarraga, con cédula de identidad 170916498-0, certifico que el presente trabajo de titulación curricular *Evaluación de la capacidad bioadsorbente de columnas elaboradas a partir de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate (Persea americana Hass.) para Plomo (Pb) y Níquel (Ni)* elaborado por la estudiante Cristina Belén Mayorga Naranjo, con cedula de identidad 171999113-3, ha concluido conforme a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Atentamente,

Dr. Julio César Vinueza Galarraga

Director de la disertación

Quito, 21 de junio de 2023

## DEDICATORIA

*A esas personas que están a mi lado desde el día cero,  
Mi madre y mi padre, que son mi fuerza y mi inspiración para ser mejor cada día.*

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres, Gissela y Eduardo, por su apoyo incondicional y porque han hecho todo lo posible para que nunca me falte nada en mis estudios ni en mi vida personal.*

*A mi hermano David y mi cuñada Sofia, que son un pilar fundamental en mi familia y siempre me han apoyado en cada paso.*

*A mi director de tesis, Dr. Julio Vinueza, por la formación recibida.*

*A Pamela Velez, Gabriela Yanez y David Romero, quienes formaron parte del proyecto CESAQ-PUCE, por la ayuda y guía durante el desarrollo del proyecto.*

*A los profesores del jurado MSc. Isabell Cipriani y Mtr. Pablo Pozo.*

*A mis amigos, que me han acompañado en este proceso y porque todos han puesto su granito de arena.*

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

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN .....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. METALES PESADOS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. PLOMO .....</b>	<b>5</b>
2.2.1. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE.....	5
2.2.2. EFECTOS EN LOS SERES VIVOS.....	5
<b>2.3 NÍQUEL .....</b>	<b>6</b>
2.3.1. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE.....	6
2.3.2. EFECTOS EN LOS SERES VIVOS.....	6
<b>2.4. MECANISMOS IMPLICADOS EN BIOSORCIÓN.....</b>	<b>6</b>
2.4.1. INTERCAMBIO IÓNICO .....	7
2.4.2. ADSORCIÓN.....	7
<b>2.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOSORCIÓN.....</b>	<b>7</b>
2.5.1. TIPO DE BIOSORBENTE .....	7
2.5.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	8
2.5.3. COLUMNAS DE LECHO FIJO .....	8
<b>2.6. DESORCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>2.7. AGUACATE .....</b>	<b>9</b>
2.7.1. TAXONOMÍA.....	9
2.7.2. CULTIVO AGUACATE EN EL ECUADOR .....	9
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>10</b>
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL .....</b>	<b>11</b>
<b>4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL .....</b>	<b>11</b>
4.2.1. DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO.....	12
4.2.2. DETERMINACIÓN DE LA CENIZA.....	12
4.2.3. DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE POROSIDAD.....	13
4.2.4. CARACTERIZACIÓN INFRARROJO .....	14

<b>4.3. PREPARACION DE LAS COLUMNAS DE LECHO FIJO .....</b>	<b>15</b>
<b>4.4. CUANTIFICACIÓN DE PLOMO Y NÍQUEL MEDIANTE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LLAMA.....</b>	<b>15</b>
4.4.1. OPERACIÓN Y ANÁLISIS EN EL EQUIPO DE FAAS .....	16
<b>4.5. ELABORACIÓN DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN .....</b>	<b>17</b>
4.5.1. ISOTERMA DE LANGMUIR .....	17
4.5.2. ISOTERMA DE FREUNDLICH .....	19
<b>4.6. CUANTIFICACIÓN DE PORCENTAJE DE DESORCIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>4.7. ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO.....</b>	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL .....</b>	<b>21</b>
5.1.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS .....	21
5.1.2. ANÁLISIS INFRARROJO CON TRANSFORMADA DE FOURIER .....	23
<b>5.2. PORCENTAJE DE BIOSORCIÓN.....</b>	<b>26</b>
<b>5.3. ISOTERMAS DE BIOSORCIÓN.....</b>	<b>31</b>
<b>5.4. DESORCIÓN .....</b>	<b>38</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1. CONCLUSIONES .....</b>	<b>43</b>
<b>6.2. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>44</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1. EQUIPO DE ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA FTIR-ATR.....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURA 2. EQUIPO DE ESPECTROSCOPÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LLAMA .....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 3. ESPECTRO INFRARROJO DE LA BIOMASA PRETRATADA CON ETILENGLICOL ..</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 4. ESPECTRO INFRARROJO DE LA BIOMASA PRETRATADA CON ETANOL .....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 5. CURVA DE CALIBRACIÓN DE PLOMO OBTENIDA EN EL EQUIPO DE FAAS .....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 6. PORCENTAJES DE ADSORCIÓN DE PLOMO.....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 7. CURVA DE CALIBRACIÓN DE NÍQUEL OBTENIDA EN EL EQUIPO FAAS.....</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 8. PORCENTAJES DE ADSORCIÓN DE NÍQUEL .....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 9. ISOTERMA DE LANGMUIR PARA LA ADSORCIÓN DE PLOMO EN BIOMASA PRETRATADA CON ETILENGLICOL Y ETANOL.....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 10. ISOTERMA DE FREUNDLICH PARA LA ADSORCIÓN DE PLOMO EN BIOMASA PRETRATADA CON ETILENGLICOL Y ETANOL.....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 11. ISOTERMA DE LANGMUIR PARA LA ADSORCIÓN DE NÍQUEL EN BIOMASA PRETRATADA CON ETILENGLICOL Y ETANOL.....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 12. ISOTERMA DE FREUNDLICH PARA LA ADSORCIÓN DE NÍQUEL EN BIOMASA PRETRATADA CON ETILENGLICOL Y ETANOL.....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 13. PORCENTAJE DE DESORCIÓN DE Pb DEL BIOSORBENTE PRETRATADO CON ETILENGLICOL.....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 14. PORCENTAJE DE DESORCIÓN DE Pb DEL BIOSORBENTE PRETRATADO CON ETANOL.....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 15. PORCENTAJE DE DESORCIÓN DE Ni DEL BIOSORBENTE PRETRATADO CON ETILENGLICOL.....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 16. PORCENTAJE DE DESORCIÓN DE Ni DEL BIOSORBENTE PRETRATADO CON ETANOL.....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 17. MOLINO EMPLEADO EN LA TRITURACIÓN DE LA BIOMASA .....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 18. PROCESO DE TAMIZADO DE LA BIOMASA .....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 19. PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA BIOMASA DESPUÉS DEL PRETRATAMIENTO</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 20. PESAJE DE LAS COLUMNAS .....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 21. PROCESO DE PERCOLACIÓN DE SOLUCIONES A TRAVÉS DE LAS COLUMNAS.</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 22. ESTÁNDAR DE NÍQUEL .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 23. ESTÁNDAR DE PLOMO.....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 24. MUFLA EMPLEADA EN EL ANÁLISIS DE CENIZAS .....</b>	<b>53</b>

**LISTA DE TABLAS**

<b>TABLA 1. TAXONOMÍA DEL AGUACATE .....</b>	<b>9</b>
<b>TABLA 2. VALORES DE <math>R_L</math>.....</b>	<b>18</b>
<b>TABLA 3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN LA MUESTRA DE SEMILLA Y CÁSCARA DE AGUACATE (<i>PERSEA AMERICANA HASS</i>).....</b>	<b>21</b>
<b>TABLA 4. IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DE LA BIOMASA DE SEMILLA Y CÁSCARA DE AGUACATE (<i>PERSEA AMERICANA HASS</i>) MEDIANTE FTIR-ATR.....</b>	<b>24</b>
<b>TABLA 5. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE ADSORCIÓN DE PLOMO.....</b>	<b>27</b>
<b>TABLA 6. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PORCENTAJE DE ADSORCIÓN DE NÍQUEL. ....</b>	<b>29</b>
<b>TABLA 7. VALORES OBTENIDOS PARA LAS ISOTERMAS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN DE PLOMO. ....</b>	<b>31</b>
<b>TABLA 8. PARÁMETROS ISOTÉRMICOS PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE PLOMO.....</b>	<b>33</b>
<b>TABLA 9. VALORES OBTENIDOS PARA LAS ISOTERMAS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN DE NÍQUEL.....</b>	<b>35</b>
<b>TABLA 10. PARÁMETROS ISOTÉRMICOS PARA EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE NÍQUEL. .</b>	<b>37</b>
<b>TABLA 11. COMPARACIÓN DE CAPACIDADES DE ADSORCIÓN DE PLOMO Y NÍQUEL PARA DIFERENTES TIPOS DE BIOSORBENTES.....</b>	<b>38</b>
<b>TABLA 12. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA DESORCIÓN DE PLOMO.....</b>	<b>39</b>
<b>TABLA 13. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA DESORCIÓN DE NÍQUEL. ....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE ANEXOS

<b>DETERMINACIÓN DE CENIZA .....</b>	<b>54</b>
<b>DENSIDAD REAL .....</b>	<b>54</b>
<b>DENSIDAD APARENTE .....</b>	<b>54</b>
<b>POROSIDAD.....</b>	<b>54</b>
<b>CONCENTRACIÓN DE LA MUESTRA DEL ANÁLISIS DE PLOMO .....</b>	<b>55</b>
<b>CONCENTRACIÓN DE LA MUESTRA DEL ANÁLISIS DE NÍQUEL .....</b>	<b>55</b>
<b>PORCENTAJE DE DESORCIÓN .....</b>	<b>55</b>
<b>PREPARACIÓN DE HCl 0,01 M.....</b>	<b>55</b>
<b>PREPARACIÓN DE HCl 1M.....</b>	<b>55</b>
<b>CURVA DE CALIBRACIÓN DE PLOMO .....</b>	<b>56</b>
<b>CURVA DE CALIBRACIÓN DE NÍQUEL .....</b>	<b>56</b>

## RESUMEN

En la actualidad, la contaminación de ecosistemas acuáticos con metales pesados representa un grave problema, ya que resultan tóxicos para los organismos vivos, incluso bajas concentraciones. Estos metales tienen la capacidad de desnaturalización de proteínas y además son persistentes en el medio ambiente. El elevado precio de los tratamientos de remoción tradicionales ha generado interés en desarrollar distintos materiales de bajo costo que tengan una alta capacidad de adsorber metales pesados en solución, por ejemplo, residuos lignocelulósicos.

El objetivo del presente estudio es evaluar la capacidad bioadsorbente de columnas elaboradas a partir de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.) para Plomo (Pb) y Níquel (Ni).

En primer lugar, se maceró la biomasa con etanol o etilenglicol ambos al 40%, durante 4 días. Posterior al filtrado de la biomasa, se la secó a 60 °C durante 24 horas. Aproximadamente 1 gramo de biomasa seca fue utilizado para armar las columnas de lecho fijo en jeringas de 5 mL y se percolaron 25 mL de soluciones metálicas a diferentes concentraciones. Las soluciones recolectadas fueron analizadas por FAAS. Finalmente se realizaron pruebas de desorción con diferentes solventes.

Los resultados demostraron una buena capacidad de adsorción al utilizar las columnas, presentando porcentajes de retención mayores a 70% para concentraciones inferiores a 130 mg/L para Pb y mayores a 20% para concentraciones inferiores a 25 mg/L para Ni. En cuanto a las isotermas de adsorción, el modelo de mejor ajuste para ambos metales fue la isoterma de Langmuir y presentaron capacidades máximas de adsorción de 2,5 mg/g para Pb y 0,2 mg/g para Ni. Adicionalmente, al realizar un lavado a la biomasa con HCl 1 M, se obtuvo un porcentaje de desorción de Pb mayor al 85% y usando HCl 0,1 M, se obtuvo un porcentaje de desorción de Ni mayor al 75%, lo cual demuestra capacidad de regeneración y reutilización de las columnas.

Finalmente, la utilización de columnas de lecho fijo empacadas con biomasa de semilla y cáscara de aguacate presentan un sistema isotérmico favorable para el caso de soluciones acuosas de Pb; sin embargo, esto no se apreció para Ni.

Palabras clave: biosorción, columnas de lecho fijo, desorción, metales pesados, níquel, plomo, semilla y cáscara de aguacate

## ABSTRACT

At present, the contamination of aquatic ecosystems with heavy metals represents a serious problem, since they are toxic to living organisms, even at low concentrations. These metals have the capacity to denature proteins and are also persistent in the environment. The high price of traditional removal treatments has generated interest in developing different low-cost materials that have a high capacity to adsorb heavy metals in solution, for example, lignocellulosic wastes.

The objective of the present study is to evaluate the bioadsorbent capacity of columns made from residual biomass of avocado (*Persea americana* Hass.) seed and peel for Lead (Pb) and Nickel (Ni).

First, the biomass was macerated with ethanol or ethylene glycol, both at 40%, for 4 days. After the biomass was filtered, it was dried at 60 °C for 24 hours. Approximately 1 gram of dried biomass was used to assemble fixed-bed columns in 5 mL syringes and 25 mL of metal solutions at different concentrations were percolated. The collected solutions were analyzed by FAAS. Finally, desorption tests were carried out with different solvents.

The results showed a good adsorption capacity when using the columns, presenting retention percentages higher than 70% for concentrations lower than 130 mg/L for Pb and higher than 20% for concentrations lower than 25 mg/L for Ni. Regarding the adsorption isotherms, for both metals the best fitting model was the Langmuir isotherm and they presented maximum adsorption capacities of 2.5 mg/g for Pb and 0.2 mg/g for Ni. Additionally, when washing the biomass with 1 M HCl, a Pb desorption percentage higher

than 85% was obtained and using 0.1 M HCl, a Ni desorption percentage higher than 75% was obtained, demonstrating the capacity for regeneration and reuse of the columns.

Finally, the use of fixed bed columns packed with avocado seed and peel biomass presents a favorable isothermal system for aqueous Pb solutions; however, this was not observed for Ni.

Keywords: biosorption, fixed-bed columns, desorption, heavy metals, nickel, lead, avocado seed and peel

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial ha generado el uso de metales pesados en distintos procesos, generando así que grandes concentraciones de estos sean emitidas a la atmósfera y/o vertidos tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres (Cardona Gutiérrez, et al., 2013). Las principales actividades que involucran la contaminación de estos metales son antropogénicas, e implican la fabricación de baterías de automóviles, elementos de construcción, fabricación de pigmentos, acumuladores eléctricos, combustión de carbón y petróleo, procesos galvanoplásticos e incineración de residuos (Muñiz Ugarte et al., 2015). La contaminación por metales pesados es uno de los problemas ambientales más importantes, ya que, resultan tóxicos para los organismos vivos, incluso a bajas concentraciones, debido a su capacidad de desnaturalización de las proteínas, no son degradables y son persistentes en el medio ambiente (Abbas, et al., 2014).

Entre los métodos tradicionales para tratar efluentes contaminados se encuentran el intercambio iónico, microfiltración, osmosis inversa y extracción con solventes. Sin embargo, estos procesos suelen ser muy costosos para realizarlos a nivel industrial (Caviedes Rubio, et al., 2015). El creciente nivel de contaminación ambiental por metales pesados, y el alto costo de los tratamientos de remoción tradicionales ha generado el interés en desarrollar distintos materiales de bajo costo que tengan una alta capacidad de adsorber metales pesados en solución (Driss Alami, 2010). En la actualidad, la biosorción ha tomado fuerza como técnica alternativa para el tratamiento de efluentes contaminados. Esta técnica se basa en la captación de metales pesados mediante una biomasa viva, muerta o inmovilizada, a través de procesos fisicoquímicos que incluyen la adsorción de moléculas e iones (Barrientos Álvarez, 2015). Entre los biosorbentes que han sido más estudiados para la captación de metales pesados se encuentran las biomásas de bacterias, hongos, levaduras, algas y residuos forestales y agroindustriales (Hernández Mestanza, et al., 2019).

Es por lo que, entre los objetivos de la presente investigación se encuentra la elaboración de columnas adsorbentes compuestas de residuos agroindustriales de semilla y cáscara de aguacate *Persea americana* Hass., determinar la eficiencia de dichas columnas para la de remoción de Pb (II) y Ni (II) de soluciones acuosas y finalmente evaluar el

porcentaje de desorción de los metales, para lograr la regeneración y reutilización de las columnas adsorbentes.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. METALES PESADOS**

Los metales pesados son un grupo extenso de elementos químicos que exhiben propiedades específicas, se los encuentra generalmente enlazados a varios complejos formando sales, aunque también pueden ser detectados en su estado elemental, tienen una densidad relativamente alta y aunque algunos de ellos son esenciales para el desarrollo de los seres vivos, la mayoría resultan tóxicos para los organismos vivos, incluso a bajas concentraciones, debido a su capacidad de desnaturalización de las proteínas y el hecho de que no son degradables y son persistentes en el medio ambiente (Abbas et al., 2014).

### **2.2. PLOMO**

El plomo es un metal pesado de color gris azulado, blando y maleable, que comúnmente se encuentra en su estado de oxidación +2 y puede formar una gran cantidad de especies distintas, siendo las especies inorgánicas las más tóxicas. Las principales actividades que involucran la contaminación de estos metales son antropogénicas y abarca tanto a la minería como a la industria petrolera, etc. (Cardona Gutiérrez et al., 2013).

#### **2.2.1. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE**

El plomo es un metal que puede afectar a la flora de un ecosistema contaminado, generando la inhibición del crecimiento de las raíces, la necrosis de las hojas, o la muerte total de la planta, ya que concentraciones altas del metal provocarían una oxidación bioquímica de la materia orgánica tardía (Tejada Tovar, et al., 2014).

#### **2.2.2. EFECTOS EN LOS SERES VIVOS**

Adicionalmente, el plomo es una sustancia que tiende a la bioacumulación en los organismos. En el ser humano, el plomo puede ocasionar efectos adversos directamente en el sistema nervioso y cardiovascular. Los principales efectos secundarios que se pueden

presentar son cólicos intestinales, debilidad muscular, infertilidad, anemia, ceguera, perdida de la memoria, e incluso la muerte (Dávila Guzmán, 2012).

## **2.3 NÍQUEL**

El níquel es un metal pesado de color blanco o plateado, duro, maleable y buen conductor eléctrico, que se encuentra en su forma catiónica 1+ y 2+. El níquel es generado por la combustión de carbón, petróleo y otros combustibles fósiles, generalmente es utilizado de forma comercial para las aleaciones en acero inoxidable y para la fabricación de monedas, se caracteriza por formar compuestos sulfuro y sulfo-arseniuros (Muñiz Ugarte et al., 2015).

### **2.3.1. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE**

Si bien no existe demasiada información sobre los efectos secundarios del níquel en el medio ambiente, se sabe que altas concentraciones presentes en el suelo de este metal puede ocasionar la muerte de las plantas, mientras que, si se presenta en aguas superficiales, el metal puede inhibir el crecimiento de algas (Jiménez, Gelabert, & Brito, 2006).

### **2.3.2. EFECTOS EN LOS SERES VIVOS**

Cuando se encuentra en el ser humano en elevadas concentraciones, puede ocasionar: erupciones cutáneas, malestar de estómago (úlceras), problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, hipertensión, alteración del material genético, cáncer, alteraciones neurológicas, y si la concentración es excesiva puede ocasionar incluso la muerte (Tejada Tovar et al., 2014).

## **2.4. MECANISMOS IMPLICADOS EN BIOSORCIÓN**

En la actualidad, la biosorción ha tomado fuerza como técnica alternativa para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados. Esta técnica se basa en la captación de metales pesados mediante una biomasa viva, muerta o inmovilizada, a través de procesos fisicoquímicos que incluyen la adsorción de moléculas e iones (Barrientos Álvarez, 2015). Consta de una fase sólida, la biomasa adsorbente, y una fase líquida, una solución; y se trata de un proceso rápido y económico que continua hasta establecerse un

equilibrio entre el metal disuelto y el enlazado al sólido (Hernández, Vázquez, Jerónimo, & Sandoval, 2016).

#### **2.4.1. INTERCAMBIO IÓNICO**

El intercambio iónico es un proceso rápido y reversible que se lleva a cabo cuando los iones metálicos presentes en la disolución se intercambian con iones presentes en la biomasa. Generalmente los iones presentes en la biomasa son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , los cuales se encuentran en la estructura de los polisacáridos (Bermejo Campos, 2016; Caviedes Rubio, et al., 2015).

#### **2.4.2. ADSORCIÓN**

Es importante mencionar que existen dos tipos de adsorción, principalmente se encuentra la adsorción física, el cual consta de un proceso rápido y reversible en el que se da la acumulación de las moléculas del metal en la superficie del sólido; en este caso únicamente intervienen atracciones electrostáticas y fuerzas de Van der Waals, por lo cual son relativamente débiles. Y, por otro lado, se encuentra la quimisorción, en la cual las fuerzas de atracción son de mayor magnitud, ya que, se implica la formación de complejos superficiales o de enlaces de coordinación (Izquierdo Sanchis, 2010).

### **2.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOSORCIÓN**

Los fenómenos de adsorción pueden verse afectados positiva o negativamente por determinadas variables como el tipo de biosorbente empleado, la temperatura, el tamaño de partícula, la presencia de otros iones, entre otros; los cuales pueden aumentar o disminuir la adsorción de iones metálicos. La adsorción tiene lugar principalmente en el interior de las partículas, en las paredes de los poros en determinados puntos (Villalón et al., 2018).

#### **2.5.1. TIPO DE BIOSORBENTE**

Existen una cantidad extensa de biosorbentes; sin embargo, las propiedades físicas y químicas de un material van a influir en la calidad del biosorbente. Si el material posee ciertos grupos funcionales que contengan oxígeno, este va a ser un mejor biosorbente, esto gracias a que grupos funcionales como carboxílicos, hidroxilos, amino, fosfóricos y

fosfodiésteres van a favorecer la biosorción de metales pesados (Cox, Smith, Warren, & Ferris, 1999; Gálvez, 2016). De forma resumida, estos grupos funcionales generalmente se encuentran en las grasas vegetales, proteínas y fibras, las cuales son la composición principal del aguacate. La cáscara del aguacate presenta alrededor del 4 al 10% de grasas totales, entre el 5 al 9% de proteína bruta y entre el 50 al 60% de fibra bruta, ya que contiene varios polisacáridos como celulosa, hemicelulosas, lignina y pectina. Mientras que la semilla del aguacate posee entre el 2 al 4% de grasas totales, del 4 al 7% de proteína bruta y del 2 al 8% de fibra bruta (Ceballos & Montoya, 2013).

### **2.5.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA**

Es importante enfatizar la importancia del tamaño de partícula del material adsorbente, ya que como la cantidad de metal adsorbible es proporcional al volumen, el cual es proporcional al área externa, entonces a un tamaño de partícula más pequeña, se tendrá mayor área de la superficie interna por su cantidad de poros por unidad de masa, teniendo de esta forma una mejor captación de los iones metálicos (Cuizano & Navarro, 2008).

### **2.5.3. COLUMNAS DE LECHO FIJO**

Existen dos formas de contacto para la biosorción de metales pesados en soluciones acuosas, en primer lugar, se encuentra el método de reactor encamisado, y también se encuentra el método de columnas de lecho fijo. Se ha demostrado que el sistema de biosorción más eficiente es el sistema de columna de lecho fijo. Dicho sistema consiste en una columna en la que se encuentra el biosorbente correctamente empaquetado y fijo, por la cual el líquido atraviesa la columna en sentido descendente (Bermejo Campos, 2016). La mayor ventaja de la utilización de este método de biosorción es que se pueden obtener eliminaciones del contaminante más elevada; esto debido a que el contaminante se elimina de la disolución conforme pasa a través de la columna y en cada nueva capa de adsorbente se puede seguir acumulando mayor cantidad de iones metálicos (Carro de Diego, 2012).

## **2.6. DESORCIÓN**

El proceso de desorción sirve para resolubilizar los metales que fueron previamente adsorbidos por la biomasa, en volúmenes muy reducidos y fáciles de manejar, aunque es necesario que el agente desorbente empleado no dañe la estructura del adsorbente ni lo

degrade. Adicionalmente, la desorción es un proceso fundamental en biosorción continua, donde las columnas pasen por varios ciclos de adsorción y desorción, y es sumamente importante para mantener la biosorción como un proceso de bajo costo, ya que, permite reutilizar la biomasa, así como recuperar el metal contaminante (Carro de Diego, 2012).

## 2.7. AGUACATE

La *Persea americana*; Mill., conocido popularmente como aguacate es una fruta comestible nativa de centro y sur América pero que es comercializada a nivel mundial. Posee múltiples variedades, siendo la más popular la variedad Hass. Es una baya con una sola semilla de tamaño variable, que abarca del 15 al 16% del peso total del fruto y destaca por sus propiedades farmacológicas (Chil Núñez, et al., 2019; Hernández López, et al., 2020).

### 2.7.1. TAXONOMÍA

**Tabla 1. Taxonomía del aguacate**

<b>Nombre común</b>	Aguacate, Palta
<b>Nombre científico</b>	<i>Persea americana</i>
<b>Reino</b>	Plantae
<b>Orden</b>	Lurales
<b>Familia</b>	Lauraceae
<b>Género</b>	<i>Persea</i>
<b>Especie</b>	<i>Persea americana</i>

### 2.7.2. CULTIVO AGUACATE EN EL ECUADOR

En el Ecuador se cultivan cinco variedades de aguacate, Guatemalteca, Hass, Booth 8, Tonnage y Choquete; la producción de estas variedades ha aumentado gracias a la actual exportación a Europa. En el 2019 se produjeron alrededor de 20 995 toneladas de aguacate y la demanda crece en un 10% cada año (Álvarez Flores, et al., 2021). Cabe señalar que, el aguacate no solo es utilizado como alimento, sino que funciona como materia prima para la elaboración de subproductos con fines, cosméticos, capilares y cuidado de salud los cuales son de alto valor a nivel nacional e internacional, es por lo que, a nivel industrial, la utilización del aguacate genera grandes cantidades de cáscaras y semillas de aguacate, que son descartadas como desechos (Morocho Nuñez, et al., 2018; Setyawan, et al., 2021).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la capacidad bioadsorbente de columnas elaboradas a partir de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.) para Plomo (II) y Níquel (II).

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Elaborar columnas adsorbentes a base de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.).

Determinar la eficiencia de las columnas adsorbentes de biomasa residual mediante la cuantificación de la concentración de plomo y níquel en solución por espectroscopía de absorción atómica de llama.

Establecer la concentración máxima de adsorción de plomo y níquel de las columnas de biomasa residual, mediante la aplicación de isotermas de adsorción.

Evaluar el porcentaje de desorción de plomo y níquel de las columnas de biomasa residual mediante espectroscopía de absorción atómica de llama.

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LA BIOMASA RESIDUAL**

La biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate se obtuvo previamente molida de la empresa “MIRA avocado oil” ubicada en la provincia de Pichincha.

Para el tratamiento y activación de la biomasa residual se tomó la metodología presentada por Aiyesanmi, Adebayo, & Arowojobe, (2020), realizando las siguientes modificaciones. Se trituró nuevamente la biomasa con ayuda de un molino de café, marca Hamilton Beach, y se tamizó por una malla de 600  $\mu\text{m}$ . A continuación, se pesó aproximadamente 50g de la biomasa en una balanza semianalítica de dos decimales BOECO Germany. Se colocó la muestra en un frasco ámbar y se agregó 500 mL de etanol al 40%, preparado en un balón aforado a partir de etanol potable al 96% y agua tipo I. Posteriormente, se desarrolló el mismo procedimiento cambiando el solvente por etilenglicol al 40% preparado a partir de etilenglicol grado técnico. Ambos frascos se dejaron en maceración durante 4 días con agitación esporádica. Transcurrido el tiempo, la biomasa húmeda se filtró en un embudo Büchner con ayuda de una bomba de vacío Millipore y se secó a 60 °C durante 24 horas en una estufa de laboratorio Memmert. Transcurrido el tiempo, se tamizó la biomasa a 600  $\mu\text{m}$  nuevamente y se almacenó dentro de fundas Ziploc 25 x 30 cm en un desecador de vidrio hasta la elaboración de las columnas a escala.

### **4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL**

Se realizó la determinación por triplicado de humedad y ceniza de la biomasa residual. La determinación del porcentaje de humedad y la determinación de la ceniza se realizaron mediante el método de ensayo propuesto por Carter Martin (1993). Adicionalmente se realiza la determinación y análisis de porosidad mediante el método propuesto por Cabrera Andrade, (2017), en el cual inicialmente se consigue la densidad real, mediante el método del picnómetro y la densidad aparente, mediante el método de la probeta, del material biosorbente. Finalmente se realizó la caracterización infrarroja por el método propuesto por García Gonzales et al., (2016).

#### 4.2.1. DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO

- Se taró una cápsula de porcelana a  $105 \pm 5$  °C aproximadamente durante una hora, tomar el tiempo con cronómetro.
- Se llevó la cápsula al desecador hasta que alcance temperatura ambiente (15 - 25°C)
- Se pesó la cápsula en la balanza analítica con resolución de 0.1 mg y anotar el peso.
- En la cápsula tarada, se pesó 5 gramos de muestra y se anotó el peso.
- Se colocó la cápsula con muestra en la estufa a  $105 \pm 5$  °C aproximadamente y dejarlas por una hora. Se tomó el tiempo con cronómetro.
- Una vez transcurrido el tiempo se sacó la cápsula y se colocó en un desecador. Dejar que se enfríe hasta que llegue a temperatura ambiente (15 - 25°C).
- Se pesó la cápsula que contenía la muestra seca y se anotó el peso.
- Se calculó el porcentaje de humedad mediante la ecuación:

$$\%H = \frac{A - B}{C} \times 100$$

Donde:

A = Peso de la 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)

#### 4.2.2. DETERMINACIÓN DE LA CENIZA

- Se taró un crisol y la tapa vacía en la mufla a 105 - 110 °C por una hora.
- Se sacó el crisol de la mufla y se colocaron en un desecador hasta que se enfríe.
- Se pesó el crisol y la tapa vacía en una balanza analítica y anotar el peso.
- Se pesó 2 g de la muestra, y se secó en la mufla a 105 °C durante 1 hora, tiempo tomado con cronómetro.
- Después del tiempo mencionado, se aumentó la temperatura de la mufla a 375 °C.
- Se retiró la tapa del crisol y se dejó la muestra en la mufla a 375 °C, durante 1 hora tiempo tomado con cronometro.
- Una vez transcurrido el tiempo se subió la temperatura a 550 °C y se dejó la muestra durante 1 hora más.

- Se sacó 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 pesó en la balanza analítica y se anotó el peso.
- Se calculó el porcentaje de cenizas mediante la ecuación:

$$\% \text{ de Cenizas} = \frac{A - C}{B} \times 100$$

Donde:

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

B = Peso de la muestra (g)

C = Peso del crisol tarado vacío con tapa (g)

#### 4.2.3. DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE POROSIDAD

- Se pesó 1 g del material biosorbente
- Se colocó el biosorbente en un picnómetro de 10 mL y se registró el peso de ambos
- Se adicionó agua grado reactivo calidad media hasta el nivel de enrase del picnómetro
- Se pesó nuevamente el picnómetro que contenía la muestra y el agua
- Se determinó la densidad real mediante la ecuación:

$$\rho_{real} = \frac{A}{B - \frac{C}{\rho_{sol}}}$$

Donde:

A = Peso del biosorbente (g)

B = Volumen del picnómetro con el solvente y la muestra a 20 °C (mL)

C = Peso del solvente que se añade al picnómetro hasta el enrase (g)

$\rho_{sol}$  = Densidad del solvente (g/mL)

- Se pesó una probeta de 10 ml vacía
- Se agregó el material biosorbente hasta alcanzar los 4 mL en la probeta
- Se pesó la probeta junto con todo el contenido
- Se determinó la densidad aparente mediante la ecuación:

$$\rho_{apt.} = \frac{A - B}{C}$$

Donde:

A = Peso de la probeta con el biosorbente (g)

B = Peso de la probeta vacía (g)

C = Volumen ocupado en la probeta

- Finalmente, se determinó la porosidad mediante la ecuación:

$$e = 1 - \frac{\rho_{apt.}}{\rho_{real}} = \frac{\rho_{real} - \rho_{apt.}}{\rho_{real}}$$

#### 4.2.4. CARACTERIZACIÓN INFRARROJO

La espectroscopía infrarroja es usada para estudiar moléculas que absorben en la región infrarroja, además, brinda información sobre las vibraciones moleculares y como consecuencia la estructura de estas. La absorción de radiación que obtiene la muestra a analizar nos proporciona información sobre grupos funcionales y tipo de enlace que posee la muestra (Mondragón Cortez, 2017).

Para la identificación de los grupos funcionales presentes en la biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate mediante la técnica de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier, con un accesorio de reflexión atenuada (FTIR-ATR). Se empleó la metodología propuesta por García Gonzales et al., (2016), donde se utilizó el equipo Spectrum BX, marca Perkin Elmer, en la región de 520 – 4000  $\text{cm}^{-1}$  y 10 barridos.



**Figura 1. Equipo de espectroscopía infrarroja FTIR-ATR.**

### **4.3. PREPARACION DE LAS COLUMNAS DE LECHO FIJO**

Para la elaboración de las columnas de lecho fijo a microescala, se pesó aproximadamente 1g de la biomasa en una balanza analítica de cuatro decimales, marca Mettler Toledo, en jeringas de 5 mL marca NIPRO y se compacta con ayuda del embolo de la jeringa haciendo presión durante 10 segundos.

Se prepararon 100 mL de soluciones acuosas de plomo y níquel a diferentes concentraciones, siendo esta una concentración mayor a la establecida en la normativa TULSMA, de 2,0 mg/L para níquel y 0,2 mg/L para plomo. Se toman alícuotas de 25 mL de dichas soluciones y se pasan por las columnas elaboradas que se encuentran colocadas en un manifold o cámara de vacío. 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.

### **4.4. CUANTIFICACIÓN DE PLOMO Y NÍQUEL MEDIANTE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LLAMA**

La espectroscopía de absorción atómica es un método comúnmente utilizado desde hace ya algunas décadas, es una técnica sensible, que permite la detección de metales en partes por millón y es específica ya que, las energías de transición electrónica son únicas para cada metal. De forma resumida, el principio de la absorción atómica se basa en un haz de luz emitido y pasa por el sistema de atomización, que contiene la muestra en forma partículas gaseosas, llega al monocromador, en donde se elimina la radiación sin interés, finalmente llega al detector que absorbe la radiación, se procesa y amplifica, dando como resultado una lectura de salida (Gallegos, Vega, & Noriega, 2012).

Para la cuantificación de los metales plomo y níquel mediante FAAS, se utilizó el equipo Aanalyst 400, marca Perkin Elmer. El método empleado está basado en el método estándar de la APHA-AWWA-WEF 3111 A: Metales por espectrofotometría de absorción atómica de llama. Se preparó una solución madre para plomo y níquel de 100 mg/L a partir del estándar de plomo ( $999 \pm 3 \mu\text{g/mL}$ ), Inorganic Ventures, Estados Unidos; y del estándar

de níquel (1000  $\mu\text{g/mL}$ ), AccuStandard, Estados Unidos. A partir de la solución madre de plomo se prepararon las soluciones para la curva de calibración de 0.3, 1, 3 y 5  $\text{mg/L}$ , así como las soluciones de sensibilidad y control de 0.5, 2 y 3.6  $\text{mg/L}$ . Mientras que, a partir de la solución madre de níquel se preparan las soluciones para la curva de calibración de 0.3, 1, 3 y 5  $\text{mg/L}$  y las soluciones de sensibilidad y control de 0.5, 2 y 8  $\text{mg/L}$ . Cada solución se preparó en balones aforados de 50mL y se aforó con agua grado reactivo calidad media.



**Figura 2. Equipo de espectroscopía de absorción atómica de llama**

#### **4.4.1. OPERACIÓN Y ANÁLISIS EN EL EQUIPO DE FAAS**

- Se abrió el cilindro de Acetileno. Se comprobó que las válvulas de paso de acetileno estén abiertas y con una presión adecuada (máximo 15 psi).
- Se encendió el espectrofotómetro de absorción atómica y la computadora.
- Se colocó las lámparas de los metales a analizar en el compartimiento de lámparas.
- Se alineó el quemador y se encendió la lámpara, asegurándose que las condiciones estén de acuerdo con el método.
- Se realizó la curva de calibración analizando en cada metal un blanco y los estándares detallados anteriormente.
- Se realizó el análisis de un estándar de control bajo al terminar de realizar la curva, este debe cumplir los criterios de aceptación y rechazo  $\pm 10\%$ .
- Se leyó un blanco de agua grado reactivo calidad media. La lectura del blanco debe ser menor al límite de cuantificación.

- Se aspiró las muestras, para analizarlas presionar ANALYZE SAMPLE, realizando tres replicas.
- Se leyó los estándares de control cada 10 muestras, para verificar que la recta de calibración se ha mantenido. El estándar de control no debe exceder del  $\pm 10\%$  de la concentración preparada.
- La concentración de la muestra se obtiene a partir de la ecuación de la curva de calibración realizada:

$$Y = aX + b$$

$$X = \frac{(Y - b)}{a}$$

$$mg \text{ metal/L} = X \times FD$$

Dónde:

X = Concentración del metal en mg/L (valor proporcionado por el equipo)

Y = Lectura de la muestra en absorbancia

a = Pendiente de la curva de calibración

b = Intercepto de la curva de calibración

FD = Factor de dilución aplicado en el análisis de la muestra

#### **4.5. ELABORACIÓN DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN**

Para poder conocer la calidad del bioadsorbente, es necesario evaluarlos mediante sus isotermas de adsorción. Las isotermas de adsorción son modelos matemáticos empleados para describir como se produce la adsorción de un soluto por un sólido, estas isotermas solo se pueden comparar al mismo nivel de pH y a la misma temperatura, porque la capacidad de adsorción de la biomasa cambia cuando cambian estos parámetros (Alleoni, Camargo, & Casagrande, 1998). Si bien existen varios modelos matemáticos para describir la adsorción, en la actualidad, los dos más utilizados para describir las isotermas de adsorción son los modelos de Freundlich y Langmuir. Estos modelos utilizan parámetros que representan las propiedades de adsorción y se pueden utilizar para comparar el rendimiento de los procesos de biosorción (Sánchez, Garza, Almaguer Cantú, Sáenz, & Montes, 2008).

##### **4.5.1. ISOTERMA DE LANGMUIR**

La isoterma de Langmuir es una ecuación matemática que fue inicialmente utilizada para describir la adsorción de gases en sólidos. Se basa principalmente en que la superficie de adsorción es homogénea, constante y se da en una superficie uniforme, además que la adsorción ocurre en monocapa y se da en sitios específicos, sin interacción con las moléculas (Leandro Silva, et al, 2020). El modelo de linealidad de Langmuir se rige bajo la siguiente ecuación:

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

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:

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

Donde:

$C_i$  = Concentración inicial del adsorbato (mg/L)

$K_L$  = Constante de Langmuir (L/mg)

Dependiendo del valor resultante de  $R_L$  se tiene:

**Tabla 2. Valores de  $R_L$**

$R_L = 0$	Proceso de adsorción irreversible
$0 < R_L < 1$	Sistema isotérmico favorable
$R_L = 1$	Desorción Lineal
$R_L > 1$	Sistema isotérmico desfavorable

Fuente: (Larenas Uría & Andrango, 2008).

#### 4.5.2. ISOTERMA DE FREUNDLICH

De forma contraria, la isoterma de Freundlich se basa en la no uniformidad de la superficie adsorbente, describe bien la adsorción dentro de ciertos límites de concentración de los iones metálicos, sin embargo, por encima de ellos presenta dificultad. Se basa principalmente en una superficie heterogénea o sitios de adsorción con diferentes afinidades (Souza, Chaves, & Fernandes, 2007).

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

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)

#### 4.6. CUANTIFICACIÓN DE PORCENTAJE DE DESORCIÓN

Los estudios de desorción se realizan con un enfoque de regenerar la biomasa residual. Para ello, se somete la biomasa a una solución ácida, siguiendo el método propuesto por (Carro de Diego, 2012) con ciertas modificaciones. Inicialmente se tomaron alícuotas de 25 mL de agua grado reactivo calidad media y se trasvasó a través de las columnas utilizadas, se recolectó la solución y se guardó hasta su cuantificación. Posteriormente se preparó una solución de ácido clorhídrico HCl 0,01M de la cual se tomaron alícuotas de 25 mL y se pasó, con ayuda de un manifold de vacío, por las columnas utilizadas, igualmente se recolectó la solución percolada y se guardó para su análisis. Procedimiento que se repitió con una solución de ácido clorhídrico HCl 1 M. Finalmente, las soluciones guardadas se analizaron por espectroscopía de absorción atómica de llama FAAS y se cuantificó la cantidad de metal desorbido. Se calcula el porcentaje de desorción mediante la siguiente fórmula:

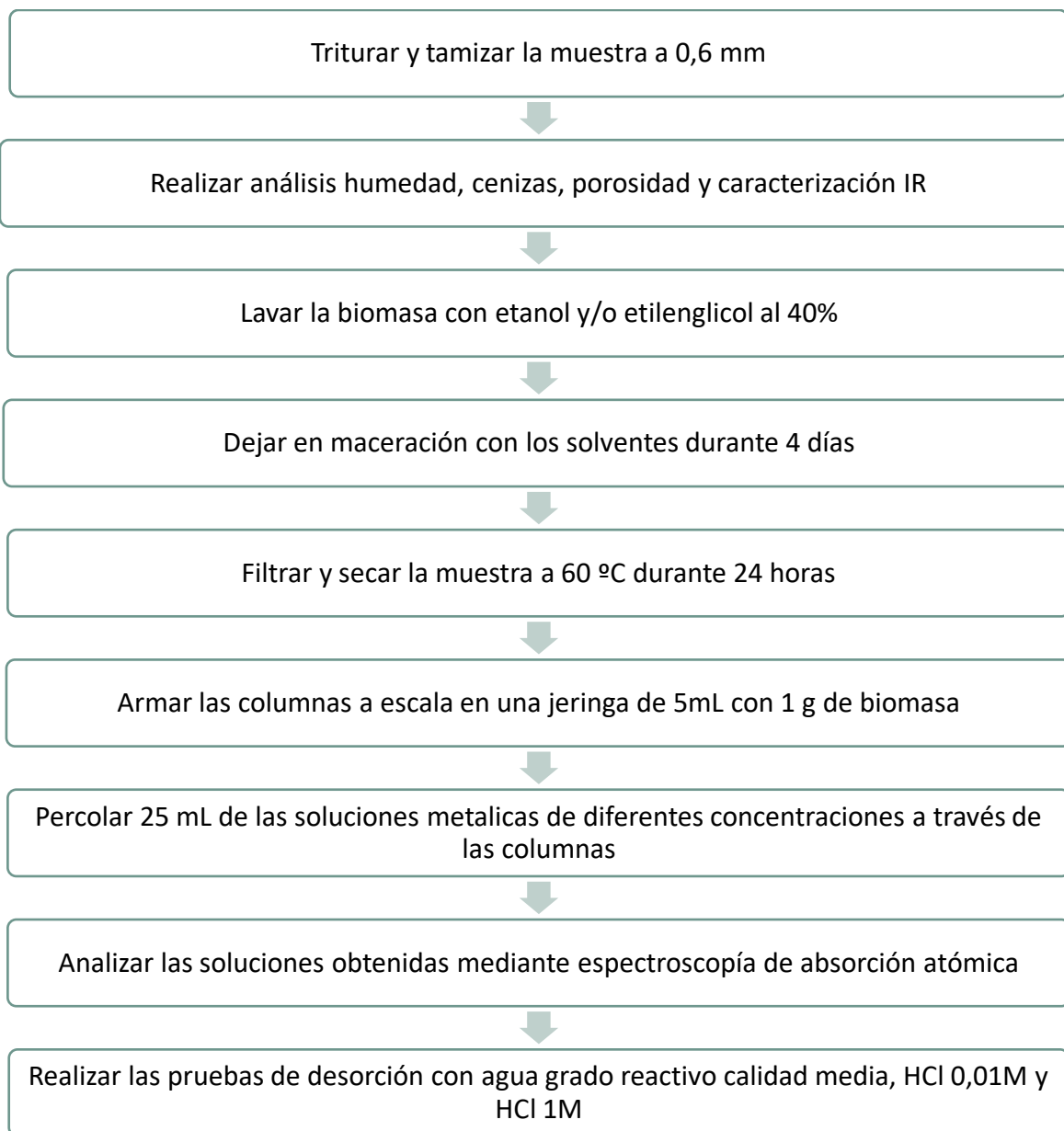
$$\% \text{ Desorción} = \frac{C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

$C_f$  = Concentración final en solución

$C_i$  = Concentración retenida

#### 4.7. ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL

La caracterización del biosorbente es esencial para comprender como se comporta el material y es útil al momento de comparar distintos biosorbentes.

#### 5.1.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Las propiedades fisicoquímicas del material adsorbente juegan un papel importante en el proceso de adsorción en general. A continuación, se muestra una tabla que contiene los parámetros fisicoquímicos analizados del biosorbente sin un pretratamiento, ya que los tratamientos incluyen una etapa de secado que pueden alterar los análisis.

**Tabla 3. Resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos en la muestra de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.).**

Característica	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
<b>Humedad</b>	7,632 %	0,050	0,653
<b>Ceniza</b>	8,915 %	0,415	4,653
<b>Plomo</b>	0,510 mg/L	0,024	4,636
<b>Níquel</b>	0,386 mg/L	0,021	5,478
<b>Densidad real</b>	0,981 g/mL	0,016	1,608
<b>Densidad aparente</b>	0,310 g/mL	0,010	3,145
<b>Porosidad</b>	0,683 g/mL	0,009	1,371

De la tabla 3 se encuentra la humedad, en el que se obtuvo un promedio de 7,632%  $\pm$  0,050, con un coeficiente de variación de 0,653% en un análisis de muestras por triplicado. El valor obtenido, concuerda con Sánchez Quezada & Loarca Piña, (2022), quien reporta valores entre 7,94 a 9,28% de humedad en harina de semilla de aguacate secada convencionalmente a 60 °C; procedimiento similar al empleado en el presente trabajo. Adicionalmente, la humedad del biosorbente se encuentra entre 5% y 10% de humedad,

rango establecido por (Cardona Gutiérrez et al., 2013), para que la humedad no degrade ni altere al biosorbente.

De igual manera, en la tabla 3 se puede observar que para el porcentaje de cenizas se obtuvo un promedio de  $8,815\% \pm 0,415$ , con un coeficiente de variación de  $4,653\%$  en un análisis de muestras por triplicado. Sánchez Quezada & Loarca Piña, (2022), reportan valores entre  $2,22$  a  $2,33\%$  de cenizas en harina de semilla de aguacate secada convencionalmente a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; valores que no concuerdan con los obtenidos en la presente investigación. La discordancia en los valores se puede justificar debido que el contenido de cenizas totales dependerá directamente del suelo en el que la planta se desarrolla, debido a la bioacumulación de minerales y metales pesados en el tejido de la vegetación (Cahuana & Aduvire, 2019). Es importante mencionar que, un elevado contenido de cenizas es perjudicial en el proceso de biosorción, ya que, indica la presencia de impurezas minerales y/o metálicas en el biosorbente (Zamora Velazco, 2010).

En la tabla 3 se puede observar también los valores obtenidos para plomo y níquel presentes en la semilla y cáscara de aguacate, obteniendo un promedio de  $0,510\text{ mg/L} \pm 0,024$  y  $0,386\text{ mg/L} \pm 0,021$  respectivamente. Ihesinachi & Eresiya (2014), reportan una cantidad de  $1,69\text{ ppm}$  de plomo y  $3,34\text{ ppm}$  de níquel en la cáscara de aguacate, estos valores son mucho mayores a los obtenidos, sin embargo, los autores mencionan que los altos valores pueden atribuirse a la contaminación ambiental predominante de la refinería y la quema de gas cercana al área de muestreo.

Asimismo, en la tabla 3 también se muestra que la densidad real del biosorbente, fue de  $0,981\text{ g/mL}$ , la densidad aparente, fue de  $0,310\text{ g/mL}$ . Es importante mencionar que, valores elevados de densidad favorecen la biosorción de iones metálicos; especialmente la densidad aparente, ya que es una medida del grado de empaquetamiento del material en columnas de lecho fijo (Izquierdo Sanchís, 2010).

Finalmente, se observa la porosidad del biosorbente en la tabla 3, de la cual se obtuvo un valor promedio de  $0,683\text{ g/mL} \pm 0,009$ , con un coeficiente de variación de  $1,371\%$  en un análisis de muestras por triplicado. Vázquez Palma, et al., (2017), mencionan que elevados valores de porosidad en el biosorbente son beneficiosos para el proceso de adsorción, ya que,

existe a un mayor número de sitios activos, y por ende tendrá una mejor adsorción de los iones metálicos.

### 5.1.2. ANÁLISIS INFRARROJO CON TRANSFORMADA DE FOURIER

Se identificaron los grupos funcionales presentes en la biomasa adsorbente de semilla y cáscara de aguacate mediante infrarrojo con transformada de Fourier con un accesorio de reflexión atenuada (FTIR-ATR).

A continuación se muestran los espectros obtenidos después del análisis infrarrojo (FTIR-ATR) de la biomasa de semilla y cáscara de aguacate previamente tratada con etanol y etilenglicol respectivamente.

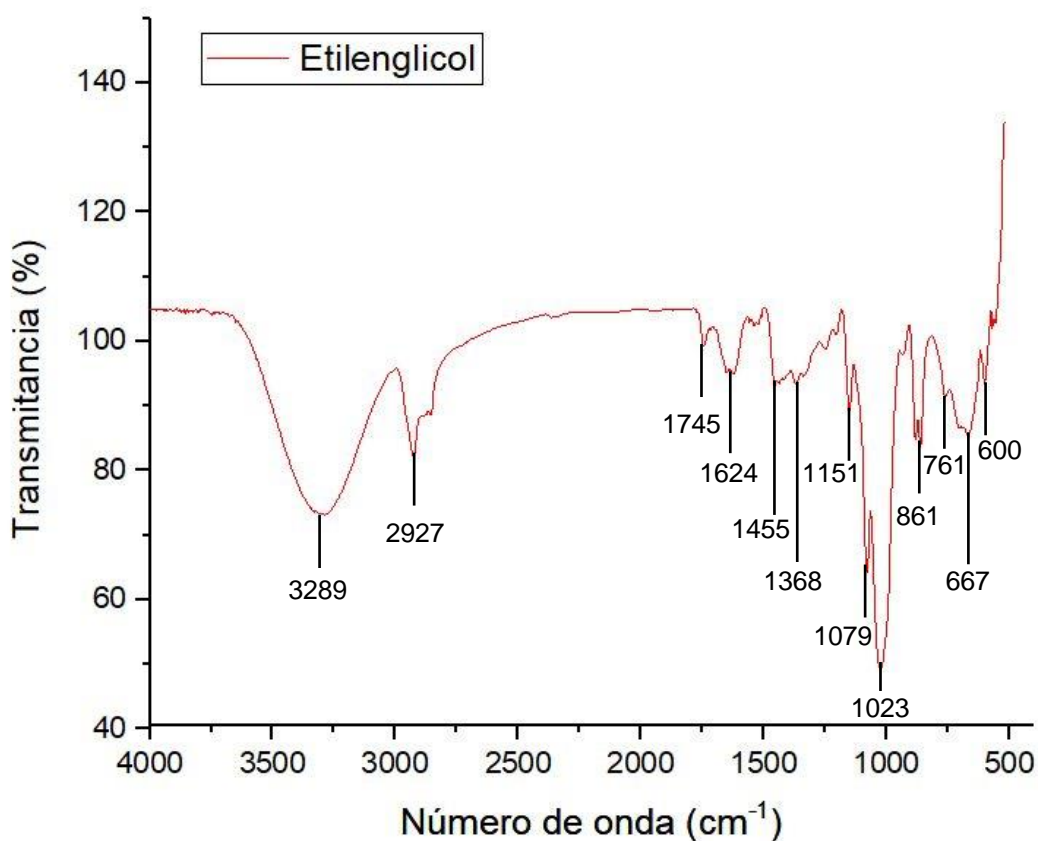
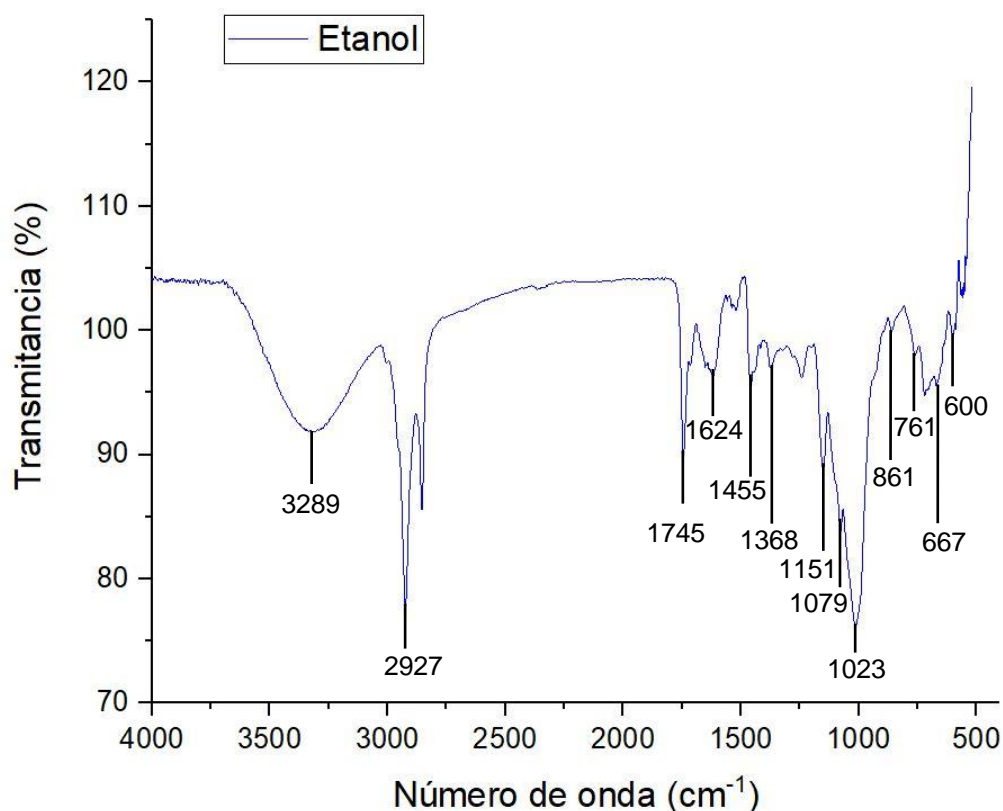


Figura 3. Espectro infrarrojo de la biomasa pretratada con etilenglicol



**Figura 4. Espectro infrarrojo de la biomasa pretratada con etanol**

Como se puede observar de la Figura 3 y Figura 4, los solventes empleados en el pretratamiento de la biomasa de semilla y cáscara de aguacate no afectan directamente en las propiedades estructurales de la biomasa, es decir el pretratamiento no ha alterado la composición química del biosorbente. Esto se puede demostrar debido a que las bandas en ambos espectros se encuentran a la misma longitud de onda.

A continuación, se detalla de forma resumida las bandas representativas de la Figura 3 y Figura 4, así mismo, se detalla el grupo funcional al que pertenece y el rango establecido para dicho grupo funcional.

**Tabla 4. Identificación de grupos funcionales de la biomasa de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.) mediante FTIR-ATR.**

Enlace	Grupo funcional	Distancia	Rango
O-H	Hidroxilo	3289	3650 – 3200

C-H, C-H <sub>2</sub>	Alcano	2927	2950 – 2800
C=O	Carbonilo	1745	1700 – 1740
C=C	Alqueno	1624	1640 - 1610
C-C	Alcano	1455	1450 – 1375
N-O	Nitro	1368	1390 – 1300
C-N	Amina	1151	1200 – 1025
C-O-C	Éteres	1079	1300 – 1000
C-O	Anhídridos	1023	1300 – 900
C-H	Aromáticos	861	850 – 800
S-O	Sulfonatos	761	1000 – 750
C-Cl	Cloruros de alquilo	667	730 – 550
C-Br, C-I	Haluros de alquilo	600	650 – 600

En la tabla 4 se muestran las bandas mas pronunciadas de el espectro infrarrojo de la semilla y cáscara de aguacate. Las vibraciones que se encuentran a  $3289,15\text{ cm}^{-1}$  corresponden al estiramiento del grupo hidroxilo (-OH), el cual puede estar presente en fenoles y ácidos carboxílicos, pero principalmente se encuentra en alcoholes. La banda encontrada a  $2927,02\text{ cm}^{-1}$  corresponde a vibraciones de estiramiento C-H, encontrados en el metil, metileno y metoxi (Massimi et al., 2018). A la longitud de onda de  $1745,07\text{ cm}^{-1}$  se identifica la vibración de carbonilo (C=O), generalmente presente en cetonas y grupos carboxilo -COOH y -COOH<sub>3</sub> de la pectina, hemicelulosa y lignina (Romero Cano, 2013). La banda presente a  $1624,06\text{ cm}^{-1}$  se le atribuye a la vibración de C=C presente en lípidos, ácidos grasos y fracciones de lignina. Tambien se describen bandas desde  $1455,96$  a  $1023,55\text{ cm}^{-1}$  las cuales corresponden a vibraciones C-C, N-O, C-N, C-O y C-O-C y una banda a  $761,60\text{ cm}^{-1}$  que corresponde a vibraciones de S-O (Massimi et al., 2018).

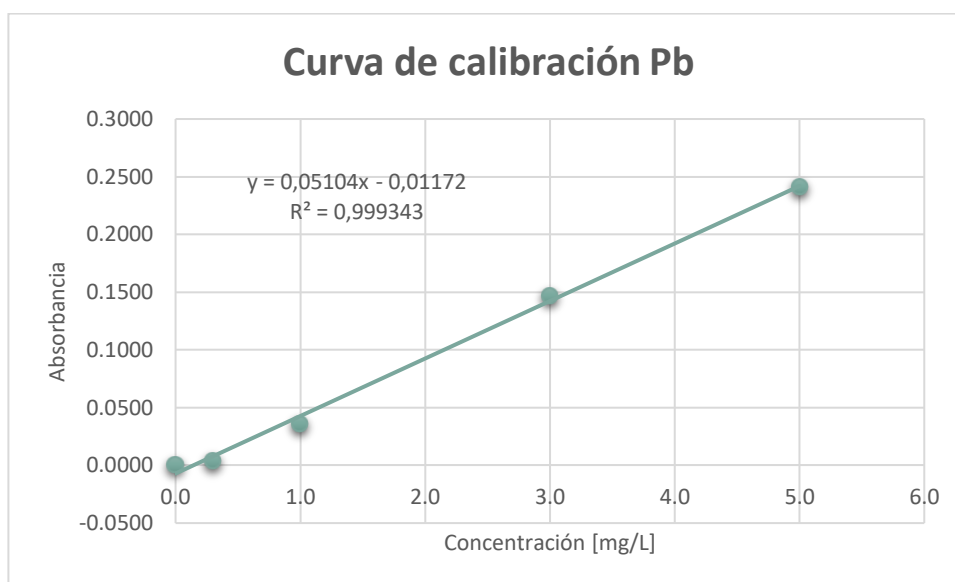
En resumen, la presencia de grupos funcioales -OH y C=O, demuestran que la semilla y cáscara de aguacate esta compuesto por grupos carboxílicos, hidroxílico, amino, sulfónico, los cuales son los responsables de la adsorción e incrementan la habilidad del material para remover metales pesados de soluciones acuosas (Mqehe-Nedzivhe et al., 2018).

## 5.2. PORCENTAJE DE BIOSORCIÓN

Todos los análisis se realizaron por triplicado y en condiciones constantes; 1g de biomasa adsorbente, tamaño de partícula a 600  $\mu\text{m}$ , pH promedio de 5,07, tiempo de percolación de 10 minutos y temperatura aproximada de 22  $^{\circ}\text{C}$ .

- **Plomo**

Para poder determinar la concentración adsorbida por la biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate, se elaboró una curva de calibración de plomo a 0, 0,3, 1, 3, y 5 mg/L.



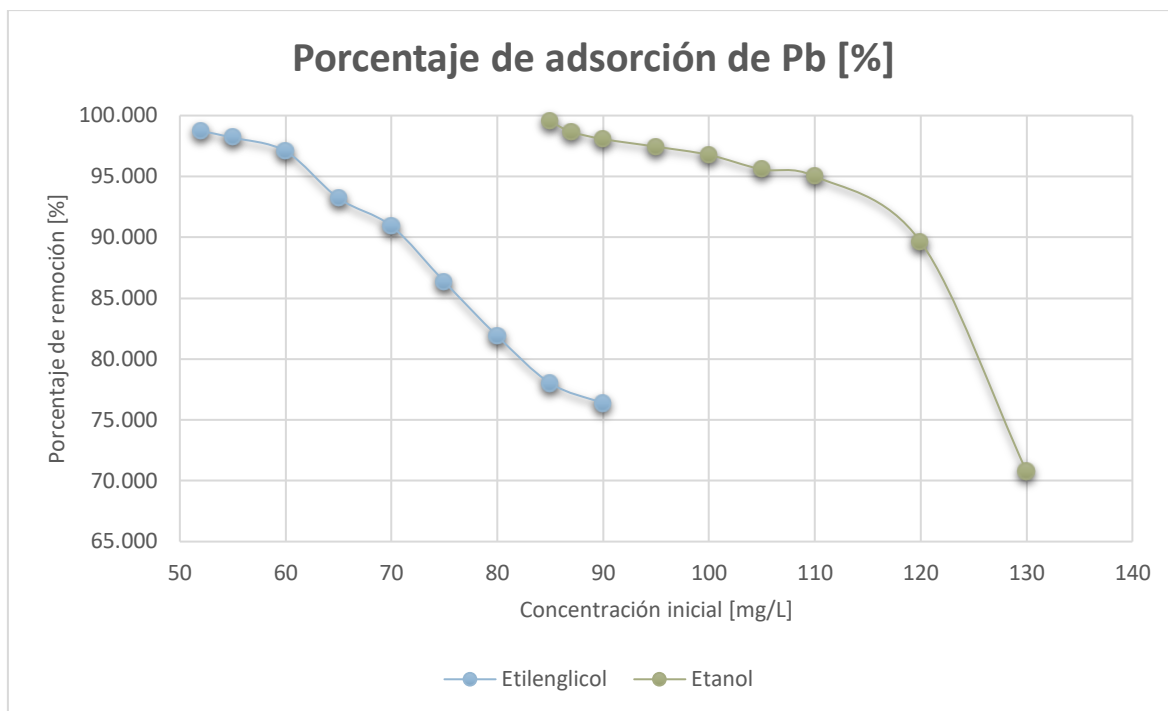
**Figura 5. Curva de calibración de plomo obtenida en el equipo de FAAS**

Como se observa en la Figura 4 la relación absorbancia-concentración es proporcional y lineal, por lo cual se infiere que a una mayor concentración se obtendrá una mayor absorbancia, esto debido a que la absorbancia se ve influenciada por la cantidad de átomos de metal excitados. La curva de calibración obtenida garantiza resultados precisos y exactos, considerando que el coeficiente de correlación obtenido fue mayor a 0,995.

A continuación se detalla el porcentaje de adsorción obtenido en los ensayos de biosorción de plomo a diferentes concentraciones, con biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate

**Tabla 5. Resultados obtenidos del porcentaje de adsorción de plomo.**

<b>Solvente de lavado</b>	<b>Concentración Pb inicial [mg/L]</b>	<b>Concentración Pb final en solución [mg/L]</b>	<b>Porcentaje de adsorción %</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Coeficiente de variación</b>
Etilenglicol	52	0,660	98,731	0,094	0,0954
	55	1,001	98,181	0,019	0,0196
	60	1,764	97,059	0,187	0,1928
	65	4,417	93,205	0,098	0,1053
	70	6,363	90,910	0,737	0,8102
	75	10,247	86,337	0,456	0,5287
	80	14,492	81,885	0,407	0,4965
	85	18,690	78,012	0,119	0,1531
	90	21,273	76,363	0,153	0,2007
Etanol	85	0,417	99,501	0,031	0,031
	87	1,165	98,661	0,041	0,041
	90	1,741	98,066	0,128	0,131
	95	2,432	97,440	0,357	0,366
	100	3,234	96,766	0,335	0,347
	105	4,651	95,570	0,247	0,259
	110	5,497	95,002	0,320	0,337
	120	8,830	89,612	0,714	0,797
	130	28,110	70,767	1,263	1,785

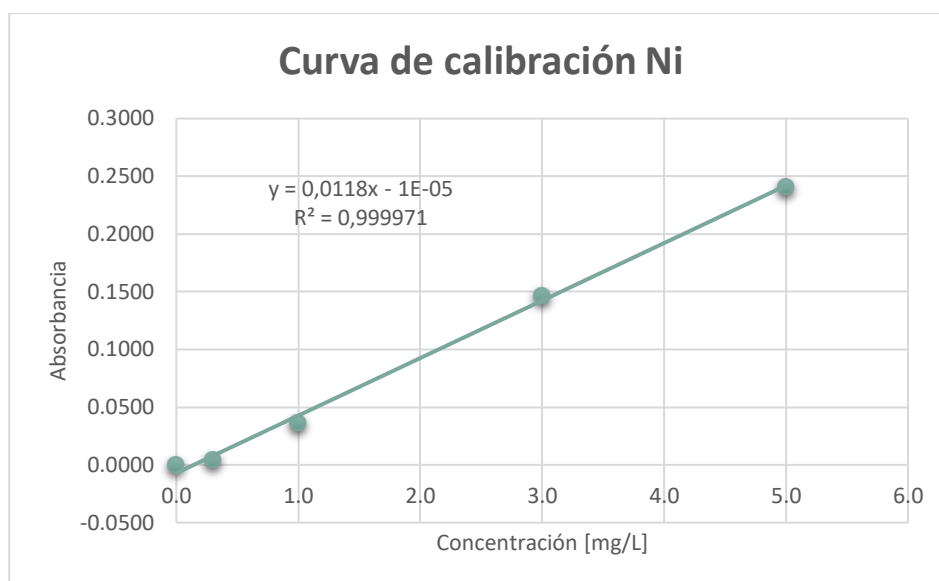


**Figura 6. Porcentajes de adsorción de plomo**

Como se puede observar en la Figura 5 el porcentaje de adsorción disminuye a medida que aumenta la concentración de metal. En cuanto a la biosorción realizada con biomasa previamente lavada con etilenglicol el porcentaje de adsorción tiene un máximo de 98,731% a una concentración de 52 mg/L y disminuye a 76,363% a una concentración de 90 mg/L. Mientras para el proceso realizado con la biomasa lavada con etanol presenta un porcentaje de adsorción máximo de 99,5 a una concentración de 85 mg/L y disminuye gradualmente hasta 95,002% a una concentración de 110 mg/L; sin embargo, tiene una disminución exponencial a a 70,767% a una concentración de 130 mg/L.

- **Níquel**

Para poder determinar la concentración adsorbida por la biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate, se elaboró una curva de calibración de níquel a 0, 0,3, 1, 3, y 5 mg/L.



**Figura 7. Curva de calibración de níquel obtenida en el equipo FAAS**

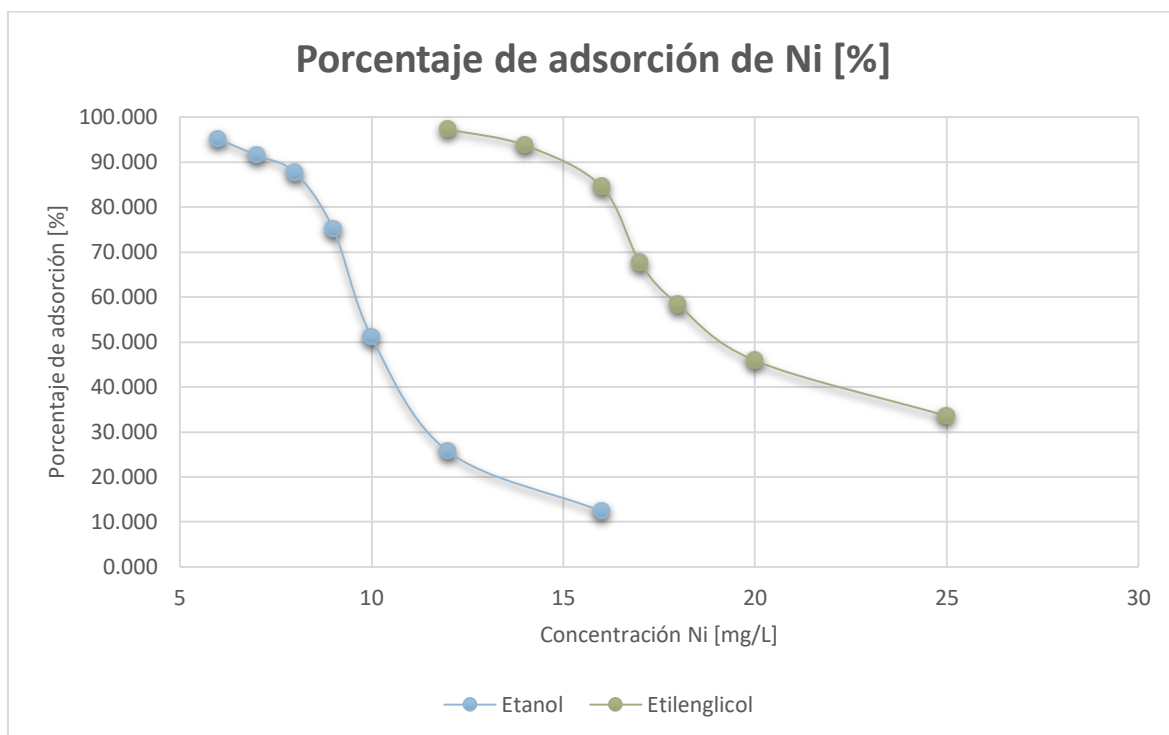
De forma muy similar a la Figura 5, como se observa en la Figura 6 la relación absorbancia-concentración es proporcional y lineal y la curva de calibración obtenida garantiza resultados precisos y exactos, considerando que el coeficiente de correlación obtenido fue mayor a 0,995.

A continuación se detalla el porcentaje de adsorción obtenido en los ensayos de biosorción de níquel a diferentes concentraciones, con biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate

**Tabla 6. Resultados obtenidos del porcentaje de adsorción de níquel.**

Solvente de lavado	Concentración Ni inicial [mg/L]	Concentración Ni final en solución [mg/L]	Porcentaje de remoción %	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Etilenglicol	6	0,343	95,100	0,343	0,3605
	7	0,596	91,486	0,474	0,5177
	8	0,986	87,679	0,151	0,1719
	9	2,243	75,078	3,749	4,9930
	10	4,890	51,100	1,630	3,1902
	12	7,921	33,992	0,878	2,5844
	16	12,017	24,896	0,219	0,8816
Etanol	12	0,331	97,242	0,225	0,231

14	0,881	93,707	0,385	0,410
16	2,471	84,558	0,814	0,962
17	5,495	67,676	5,162	7,627
18	7,516	58,243	1,041	1,787
20	10,828	45,858	2,972	6,481
25	16,613	33,547	1,447	4,313



**Figura 8. Porcentajes de adsorción de níquel**

En la Figura 7 se puede observar que el porcentaje de adsorción disminuye a medida que aumenta la concentración de metal. En cuanto a la biosorción realizada con biomasa previamente lavada con etilenglicol el porcentaje de adsorción tiene un máximo de 95,100% y disminuye drásticamente a 24,896 % a concentraciones de 6 mg/L a 16 mg/L. Mientras para el proceso realizado con la biomasa lavada con etanol presenta un porcentaje de adsorción máximo de 97,242 % y disminuye hasta 33,547 % a concentraciones de 12 mg/L a 25 mg/L de níquel. Si bien, níquel presenta un porcentaje de adsorción significativamente menor a plomo, esto podría estar relacionado con que los iones de níquel son más solubles que los de plomo, generando así que parte del níquel atraído por los grupos funcionales, sea desorbido nuevamente a la solución (Fernández Villalón, Calzado Lamela, Cascaret Carmenaty, & Pérez Silva, 2018).

Como se pudo observar de las Figuras 5 y 7, tanto para el plomo como para el níquel, el porcentaje de adsorción se reduce conforme aumenta la concentración, en otro términos, a medida que aumenta la concentración del metal, mayor cantidad de iones quedan en la solución y sin adsorber (Aiyesanmi, Okoronkwo, & Akinmolayan, 2013).

La reducción del porcentaje de adsorción puede deberse principalmente a la saturación de los sitios activos en la superficie del adsorbente. Sanchez Silva, González Estrada, Blancas Benitez, & Fonseca Cantabrana, (2020), mencionan que la superficie disponible del biosorbente se vuelve más pequeña a medida que los iones metálicos se van adsorbiendo en ella, por ende se satura y la eficiencia comienza a disminuir llegando a un punto en que los iones metálicos se pueden llegar a desorber. Olasehinde, Adegunloye, Adebayo, & Oshodi, (2018), confirman lo anteriormente dicho y postula que la ineficiencia del material biosorbente a medida que aumenta la concentración, implica que existe un aumento en la competencia de iones por los sitios activos de la superficie del adsorbente (Hernández, Vázquez, Jerónimo, & Sandoval, 2016; Tapia Maldonado & Somme Márquez, 2021).

### 5.3. ISOTERMAS DE BIOSORCIÓN

Las isotermas de adsorción en equilibrio son importantes para entender de mejor manera los sistemas de adsorción, ya que relaciona la cantidad de contaminante adsorbido en la interfase con su concentración en la fase. Determinar la isoterma de adsorción que rige el sistema también es importante para determinar si se trata de un proceso de quimisorción o fisisorción (Husein, 2013).

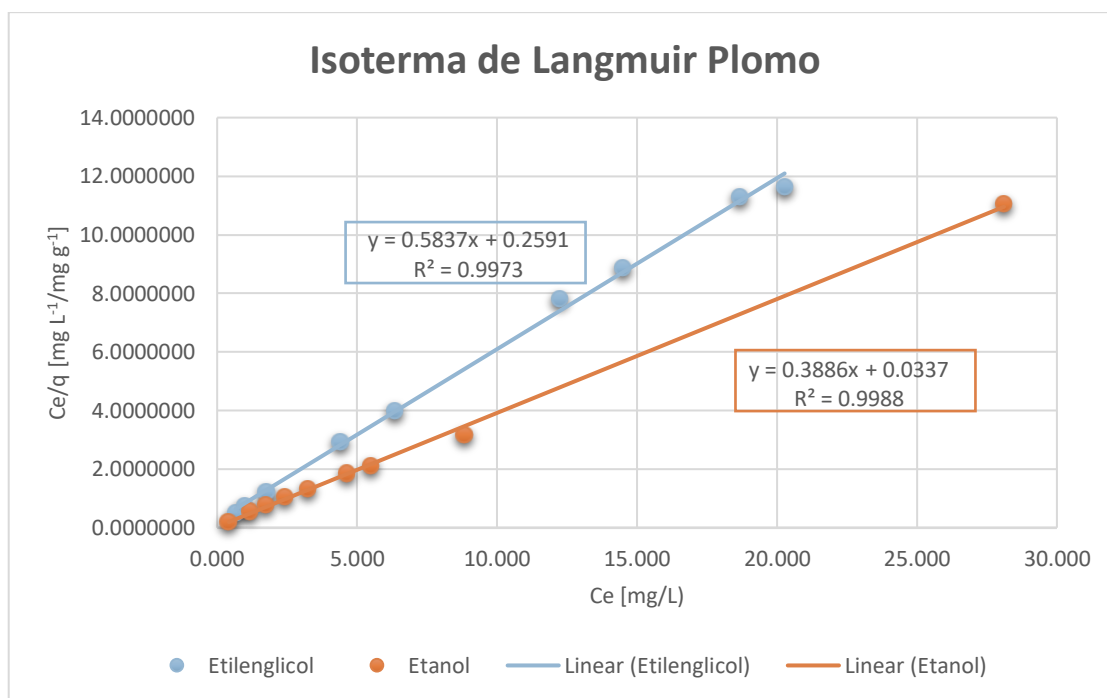
- **Plomo**

A continuación, se muestra la tabla que contiene los parámetros tanto de la isoterma de Langmuir como de Freundlich para el proceso de biosorción de plomo (II)

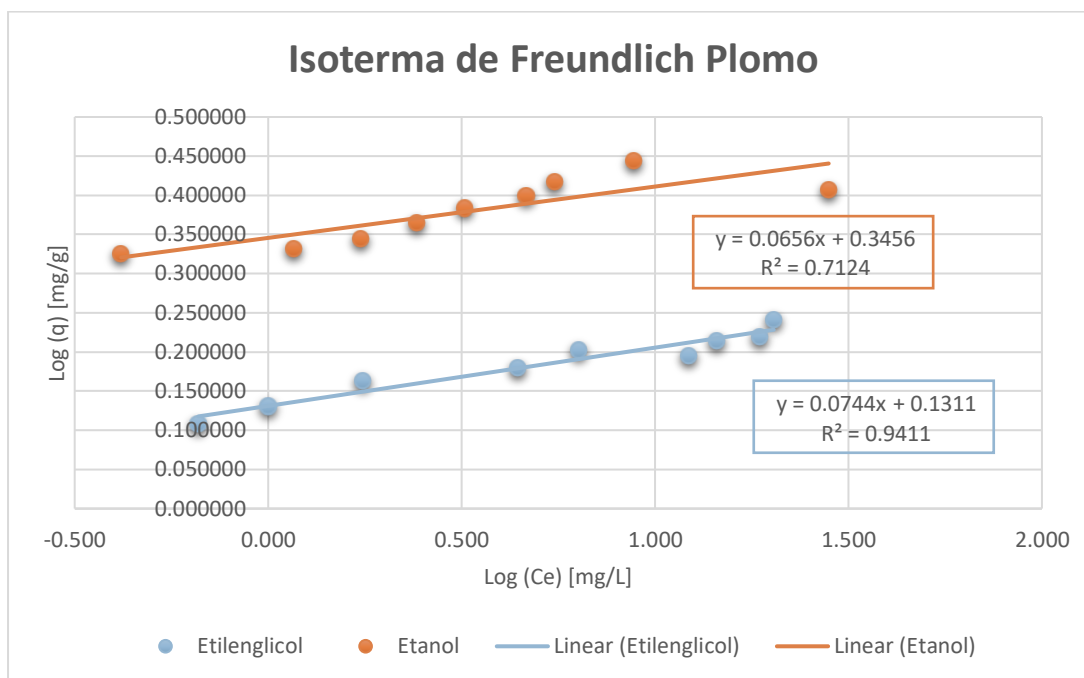
**Tabla 7. Valores obtenidos para las isotermas del proceso de adsorción de plomo.**

Solvente de lavado	Masa [g]	C <sub>i</sub> [mg/L]	C <sub>e</sub> [mg/L]	Langmuir		Freundlich	
				q [µg/g]	C <sub>e</sub> /q	Log (C <sub>e</sub> ) [mg/L]	Log (q) [mg/g]

Etilenglicol	1,0003	52	0,660	1283,19	0,0005	-0,181	3,11
	1,0010	55	1,001	1348,70	0,0007	0,000	3,13
	1,0010	60	1,764	1454,51	0,0012	0,247	3,16
	1,0010	65	4,417	1513,03	0,0029	0,645	3,18
	1,0004	70	6,363	1590,38	0,0040	0,804	3,20
	1,0011	75	12,247	1567,18	0,0078	1,088	3,20
	1,0006	80	14,492	1636,79	0,0089	1,161	3,21
	1,0006	85	18,690	1656,80	0,0113	1,272	3,22
	1,0006	90	20,273	1742,21	0,0116	1,307	3,24
Etanol	1,0005	85	0,417	2113,52	0,0002	-0,380	3,33
	1,0005	87	1,165	2144,81	0,0005	0,066	3,33
	1,0002	90	1,741	2205,96	0,0008	0,241	3,34
	1,0002	95	2,432	2313,81	0,0011	0,386	3,36
	1,0007	100	3,234	2417,54	0,0013	0,510	3,38
	1,0001	105	4,651	2508,38	0,0019	0,668	3,40
	1,0001	110	5,497	2612,22	0,0021	0,740	3,42
	1,0007	120	8,830	2777,21	0,0032	0,946	3,44
	1,0003	130	28,110	2546,40	0,0110	1,449	3,41



**Figura 9. Isoterma de Langmuir para la adsorción de plomo en biomasa pretratada con etilenglicol y etanol**



**Figura 10. Isoterma de Freundlich para la adsorción de plomo en biomasa pretratada con etilenglicol y etanol**

Como se muestra en la Figura 8 la isoterma de Langmuir para el biosorbente previamente lavada con etilenglicol presenta una recta con pendiente 0,5837, un intercepto de +0,259 y un coeficiente de correlación de 0,9973. Mientras que para la biomasa tratada con etanol se obtuvo una recta con pendiente 0,3886, un intercepto de +0,0337 y un coeficiente de correlación de 0,9988.

Por otro lado, en la Figura 9 se puede observar que la isoterma de Freundlich del proceso realizado con biomasa previamente tratada con etilenglicol presentó una recta con pendiente 0,07744, un intercepto de +0,1311 y un coeficiente de correlación de 0,9411. Mientras que, para el proceso realizado con biomasa lavada con etanol se obtuvo una recta con pendiente 0,0656, un intercepto de +0,3456 y un coeficiente de correlación de 0,7124.

Adicionalmente, se obtuvieron los valores de  $q_{\max}$  y  $K_L$  de la ecuación lineal de Langmuir, y los valores de  $K_F$  y  $n$  de la ecuación linealizada de Freundlich.

**Tabla 8. Parámetros isotérmicos para el proceso de adsorción de plomo.**

Solvente de lavado	Langmuir				Freundlich		
	$K_L$ [L/mg]	$q_{max}$ [mg/g]	$R_L$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
Etilenglicol	1,999	1,713	0,00730	0,9973	1352,380	13,441	0,9411
Etanol	13,333	2,573	0,00075	0,9988	2216,154	15,244	0,7124

Como se puede observar en la tabla 8, el valor obtenido para la constante de Langmuir en la biosorción de plomo con biomasa previamente tratada con etilenglicol fue de 1,999 L/mg, la capacidad máxima de adsorción fue de 1,713 mg/g, su factor de separación fue de 0,00730 y su coeficiente de correlación de 0,9973, mientras que para la isoterma de Freundlich del mismo proceso, se obtuvo una constante de 1352,380, un parámetro de heterogeneidad (constante de intensidad de adsorción) “n” de 13,441 y un coeficiente de correlación de 0,9411.

Por otro lado, en la tabla 8 también se observa que para el proceso realizado con la biomasa tratada con etanol, se obtuvo una constante de Langmuir de 13,333 L/mg, la capacidad máxima de adsorción fue de 2,573 mg/g, su factor de separación fue de 0,00075 y su coeficiente de correlación de 0,9988, mientras que para la isoterma de Freundlich del mismo proceso, se obtuvo una constante de 2216,154, un parámetro de heterogeneidad (constante de intensidad de adsorción) “n” de 15,244 y un coeficiente de correlación de 0,7124.

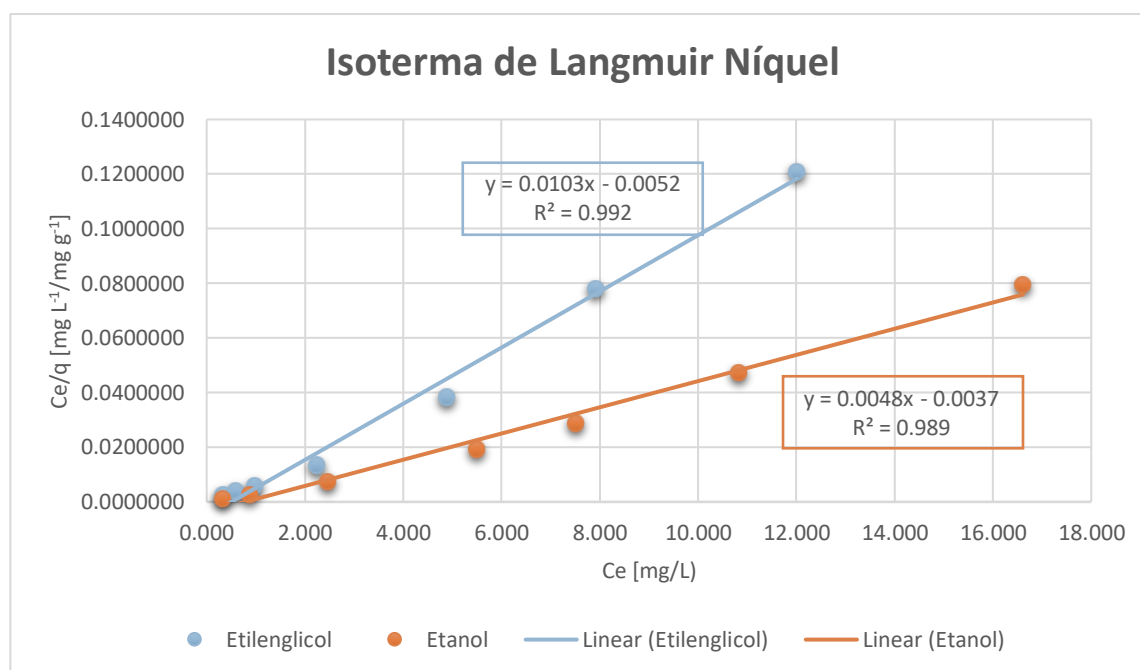
Si se compara los valores del coeficiente de relación en las isotermas de Langmuir con los obtenidos en las isotermas de Freundlich, podemos observar claramente que, tanto para el proceso realizado con biomasa tratada con etilenglicol, como el proceso realizado con biomasa tratada con etanol, los coeficientes de correlación en la isoterma de Langmuir son mayores, por lo cual se puede inferir que el proceso se rige bajo dicha isoterma. Además, en ambos casos del tratamiento de biomasa se puede observar en la tabla 8 que el  $R_L$ , reflejan valores entre 0 y 1 ( $0 < R_L < 1$ ), por lo cual, si se observa en la tabla 2 se trata de un proceso de adsorción favorable (Larenas Uría & Andrango, 2008).

- **Níquel**

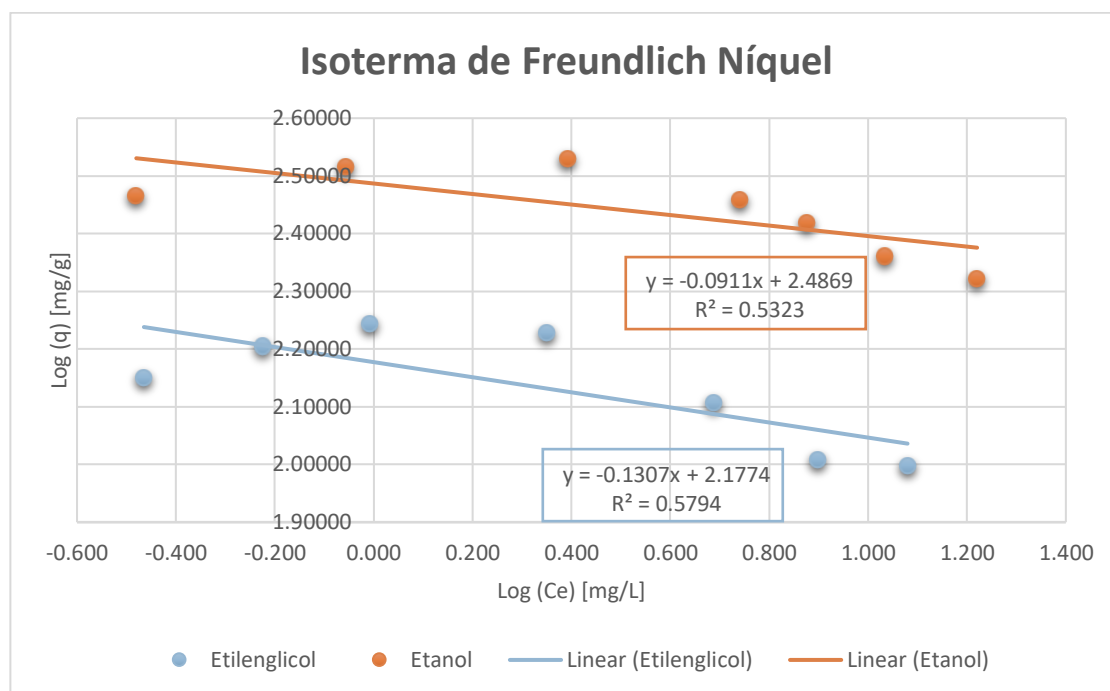
A continuación, se muestra la tabla que contiene los parámetros tanto de la isoterma de Langmuir como de Freundlich para el proceso de biosorción de níquel (II).

**Tabla 9. Valores obtenidos para las isotermas del proceso de adsorción de níquel.**

Solvente de lavado	Masa [g]	Ci [mg/L]	Ce [mg/L]	Langmuir		Freundlich	
				q [ $\mu\text{g/g}$ ]	Ce/q	Log (Ce) [mg/L]	Log (q) [mg/g]
Etilenglicol	1,0003	6	0,343	141,39	0,0024	-0,465	2,15
	1,0007	7	0,596	159,99	0,0037	-0,225	2,20
	1,0006	8	0,986	175,26	0,0056	-0,006	2,24
	1,0007	9	2,243	168,81	0,0133	0,351	2,23
	1,0007	10	4,890	127,66	0,0383	0,689	2,11
	1,0007	12	7,921	101,90	0,0777	0,899	2,01
	1,0001	16	12,017	99,57	0,1207	1,080	2,00
Etanol	1,0000	12	0,331	291,73	0,0011	-0,480	2,46
	1,0003	14	0,881	327,87	0,0027	-0,055	2,52
	1,0001	16	2,471	338,19	0,0073	0,393	2,53
	1,0007	17	5,495	287,41	0,0191	0,740	2,46
	1,0006	18	7,516	261,93	0,0287	0,876	2,42
	1,0001	20	10,828	229,27	0,0472	1,035	2,36
	1,0004	25	16,613	209,58	0,0793	1,220	2,32



**Figura 11. Isoterma de Langmuir para la adsorción de níquel en biomasa pretratada con etilenglicol y etanol**



**Figura 12. Isoterma de Freundlich para la adsorción de níquel en biomasa pretratada con etilenglicol y etanol**

Como se muestra en la Figura 10 la isoterma de Langmuir para el biosorbente previamente lavada con etilenglicol presenta una recta con pendiente 0,0103, un intercepto de -0,0052 y un coeficiente de correlación de 0,992. Mientras que para la biomasa tratada con etanol se obtuvo una recta con pendiente 0,0048, un intercepto de -0,0037 y un coeficiente de correlación de 0,989.

Por otro lado, en la Figura 11 se puede observar que la isoterma de Freundlich del proceso realizado con biomasa previamente tratada con etilenglicol presentó una recta con pendiente -0,0911, un intercepto de +2,4869 y un coeficiente de correlación de 0,5323. Mientras que, para el proceso realizado con biomasa lavada con etanol se obtuvo una recta con pendiente -0,1307, un intercepto de +2,1774 y un coeficiente de correlación de 0,5794.

Adicionalmente, se obtuvieron los valores de  $q_{\max}$  y  $K_L$  de la ecuación lineal de Langmuir, y los valores de  $K_F$  y  $n$  de la ecuación linealizada de Freundlich.

**Tabla 10. Parámetros isotérmicos para el proceso de adsorción de níquel.**

Solvente de lavado	Langmuir				Freundlich		
	$K_L$ [L/mg]	$q_{max}$ [ $\mu\text{g/g}$ ]	$R_L$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
Etilenglicol	-1,981	0,097	1,0535	0,992	150,453	-7,651	0,5794
Etanol	-1,297	0,208	1,0692	0,989	306,832	-10,977	0,5323

Como se puede observar en la tabla 10, el valor obtenido para la constante de Langmuir en la biosorción de plomo con biomasa previamente tratada con etilenglicol fue de 1,999 L/mg, la capacidad máxima de adsorción fue de 1,713 mg/g, su factor de separación fue de 0,00730 y su coeficiente de correlación de 0,9973, mientras que para la isoterma de Freundlich del mismo proceso, se obtuvo una constante de 1352,380, un parámetro de heterogeneidad (constante de intensidad de adsorción) “n” de 13,441 y un coeficiente de correlación de 0,9411.

Por otro lado, en la tabla 10 también se observa que para el proceso realizado con la biomasa tratada con etanol, se obtuvo una constante de Langmuir de 13,333 L/mg, la capacidad máxima de adsorción fue de 2,573 mg/g, su factor de separación fue de 0,00075 y su coeficiente de correlación de 0,9988, mientras que para la isoterma de Freundlich del mismo proceso, se obtuvo una constante de 2216,154, un parámetro de heterogeneidad (constante de intensidad de adsorción) “n” de 15,244 y un coeficiente de correlación de 0,7124.

Si se compara los valores del coeficiente de relación en las isotermas de Langmuir con los obtenidos en las isotermas de Freundlich, podemos observar claramente que, tanto para el proceso realizado con biomasa tratada con etilenglicol, como el proceso realizado con biomasa tratada con 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. Además, en ambos casos del tratamiento de biomasa se puede observar en la tabla 10 que el  $R_L$ , reflejan valores mayores a 1 ( $R_L > 1$ ), por lo cual como se observa en la tabla 2, se trata de un proceso de adsorción desfavorable (Larenas Uría & Andrango, 2008).

Es correcto decir que, tanto para el plomo como para el níquel, el proceso de adsorción se ajusta a la isoterma de Langmuir. La isoterma de Langmuir es un modelo

empírico que describe la distribución de equilibrio de iones metálicos entre las fases sólida, la biomasa residual, y la líquida, la solución metálica (Castellar Ortega, Cardozo Arrieta, Suarez Guerrero, & Vega Taboada, 2013). Además, es importante mencionar que el modelo de la isoterma de Langmuir representa que el proceso se trata de una adsorción química, que la adsorción ocurre como una monocapa en la superficie del biosorbente que contiene sitios activos específicos, que una única molécula de metal se adsorbe en cada sitio y esta molécula se mantiene fija en su posición, y que la energía de adsorción es constante durante todo el proceso (Romero Cano, 2013).

**Tabla 11. Comparación de capacidades de adsorción de plomo y níquel para diferentes tipos de biosorbentes.**

Biosorbente	Metal	$q_{\max}$ [mg/g]	Autor
Hueso de olivo	Pb	9,261	(Fiol et al., 2006)
	Ni	2,130	
Aserrín	Pb	15,900	(Bulut & Tez, 2007)
	Ni	3,290	
Vainas del bosque	Pb	8,330	(Aiyesanmi, et al., 2013)
	Ni	9,980	

Si se compara los valores de capacidad máxima de adsorción de los biosorbentes de la tabla 11, con los obtenidos mediante la biosorción con semilla y cáscara de aguacate en las tablas 8 y 10, se puede evidenciar que estos últimos son moderadamente más bajos que los de varios biosorbentes basados en biomasa correspondientes informados en la literatura. En consecuencia, las columnas elaboradas a partir de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate son menos eficiente para la biosorción de plomo y níquel en soluciones acuosas.

#### 5.4. DESORCIÓN

La adsorción debe ser un proceso eficiente y económico, es por lo que, se busca la regeneración y reutilización del biosorbente, así como, la recuperación de los iones metálicos. La desorción es un proceso que permite la regeneración de las columnas de lecho fijo realizadas a partir de semilla y cáscara de aguacate. Aiyesanmi, Adebayo, Okoronkwo,

& Ekujumi, (2022), mencionan que el método más eficiente para la desorción de iones metálicos es el tratamiento con un ácido diluido.

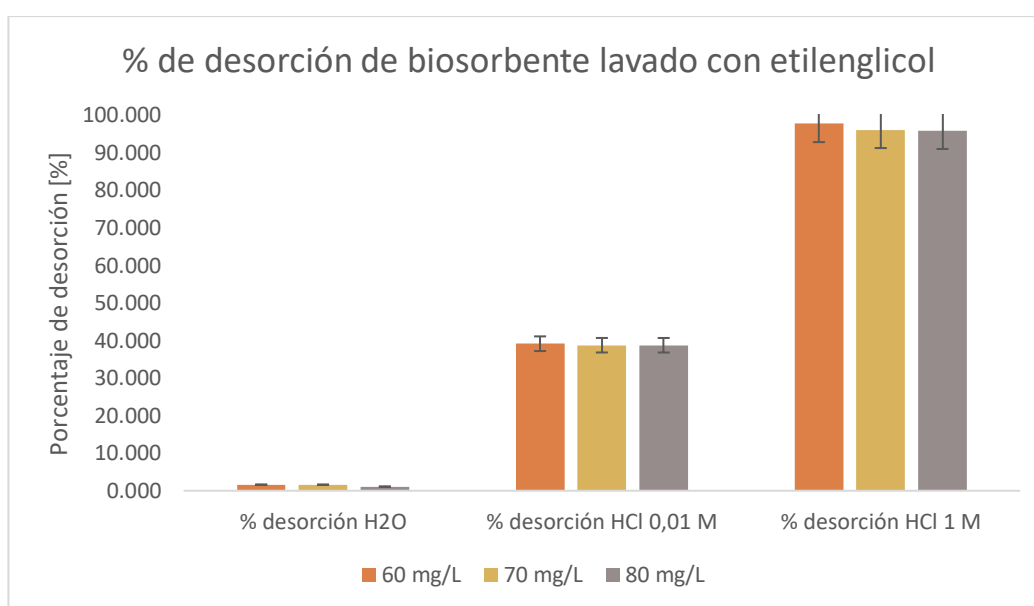
El proceso de desorción para plomo (II) y níquel (II) se realizó con tres solventes distintos; agua, ácido clorhídrico 0,01 M y ácido clorhídrico 1 M.

- **Plomo**

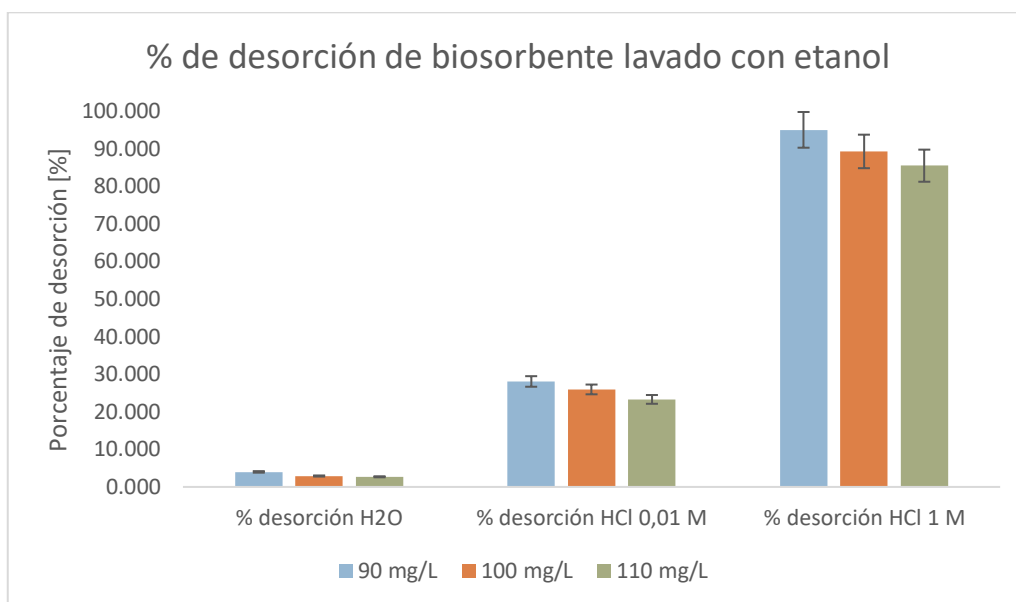
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el proceso de desorción de plomo de las columnas de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate pretratada con etilenglicol y etanol.

**Tabla 12. Resultados obtenidos para la desorción de plomo.**

<b>Solvente de lavado</b>	<b>Concentración Pb [mg/L]</b>	<b>% desorción H<sub>2</sub>O</b>	<b>% desorción HCl 0,01 M</b>	<b>% desorción HCl 1 M</b>
Etilenglicol	60	1,610	39,135	97,688
	70	1,608	38,739	96,022
	80	1,089	38,730	95,764
Etanol	90	4,006	28,077	95,055
	100	2,914	25,956	89,308
	110	2,703	23,304	85,512



**Figura 13. Porcentaje de desorción de Pb del biosorbente pretratado con etilenglicol**



**Figura 14. Porcentaje de desorción de Pb del biosorbente pretratado con etanol**

Como se puede observar en la Figura 12, para la desorción de plomo de la columna elaborada a partir de biomasa de semilla y cáscara de aguacate lavada con etilenglicol se obtuvo un porcentaje de desorción menor al 2% utilizando agua, menor al 40% utilizando HCl 0,01M y aproximadamente 97% con HCl 1M. Como se puede observar en la Figura 13, para la la desorción de plomo de la columna elaborada a partir de biomasa de semilla y cáscara de aguacate lavada con etanol se obtuvo resultados similares, ya que, el porcentaje de desorción con agua fue menor al 5%, con HCl 0,01M fue menor al 30% y con HCl 1M se obtuvo un porcentaje aproximado a 95%.

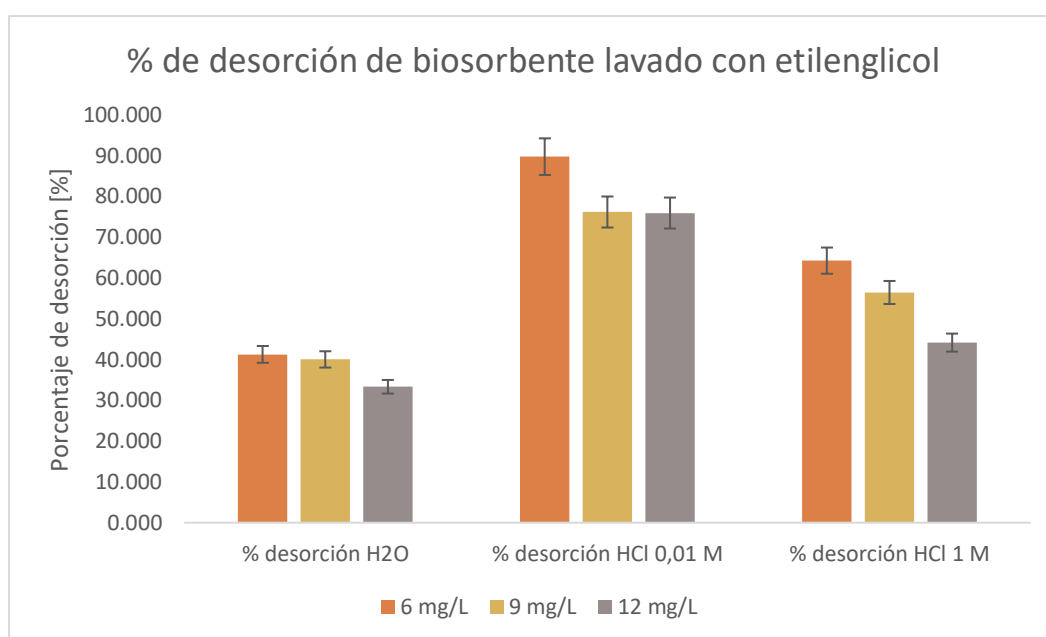
- **Níquel**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el proceso de desorción de níquel de las columnas de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate pretratada con etilenglicol y etanol.

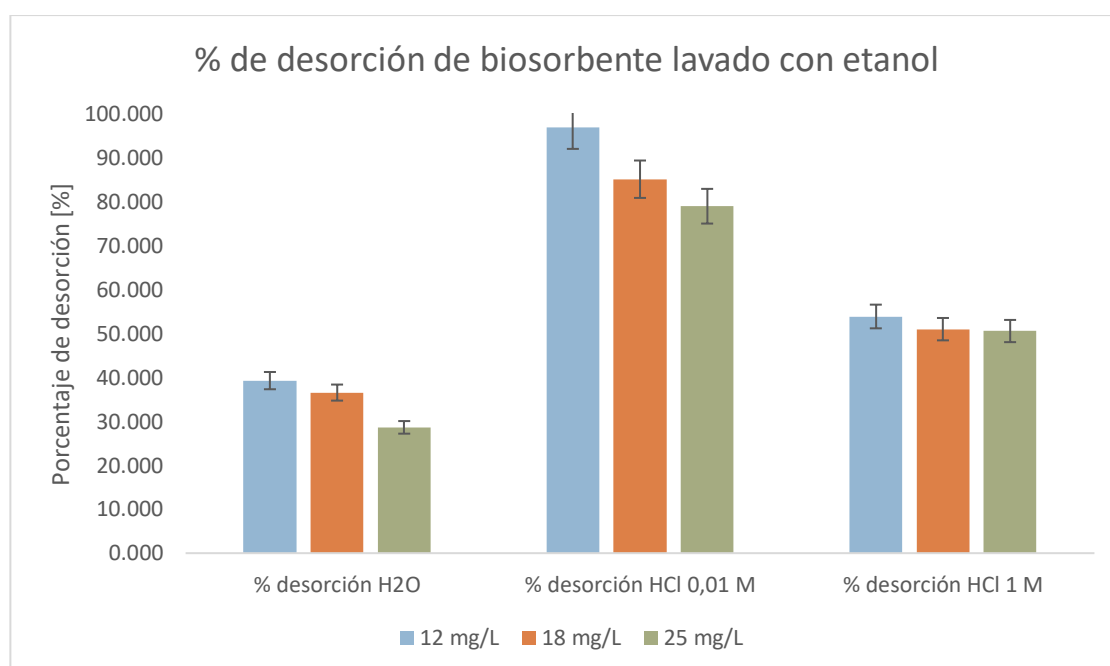
**Tabla 13. Resultados obtenidos para la desorción de níquel.**

Solvente de lavado	Concentración Ni [mg/L]	% desorción H <sub>2</sub> O	% desorción HCl 0,01 M	% desorción HCl 1 M
Etilenglicol	6	41,276	89,783	64,274

	9	40,047	76,202	56,467
	12	33,339	75,950	44,170
	12	39,292	96,902	53,895
Etanol	18	36,566	85,152	51,008
	25	28,645	79,004	50,581



**Figura 15. Porcentaje de desorción de Ni del biosorbente pretratado con etilenglicol**



**Figura 16. Porcentaje de desorción de Ni del biosorbente pretratado con etanol**

Como se muestra en la Figura 14, para la desorción de níquel de la columna elaborada a partir de biomasa de semilla y cáscara de aguacate lavada con etilenglicol, se recuperó aproximadamente el 40% de los iones Ni (II) de la biomasa utilizando agua, aproximadamente el 89% de níquel utilizando HCl 0,01M y aproximadamente 60% utilizando HCl 1M. Como se puede observar en la Figura 15, para la la desorción de plomo de la columna elaborada a partir de biomasa de semilla y cáscara de aguacate lavada con etanol se obtuvo resultados similares, debido a que se recuperó menos del 40% de los iones Ni (II) de la biomasa utilizando agua, aproximadamente el 95% de níquel utilizando HCl 0,01M y menos del 55% utilizando HCl 1M.

Es importante mencionar que los procesos de desorción tanto para plomo como para níquel presentan mejores resultados en medio ácido, esto se puede explicar debido a la alta cantidad de iones hidrógeno presentes en las soluciones ácidas. Los iones hidrógeno protonan a los grupos carboxilo, carbonilo e hidroxilo, responsables de la biosorción, y estos dejan de atraer a los iones metálicos, para luego liberarlos en la solución de recuperación (Olasehinde et al., 2018). Además, al protonarse los grupos de adsorción, estos quedan nuevamente disponibles para otro proceso de adsorción, regenerando así el biosorbente (Dávila Guzmán, 2012).

Los resultados obtenidos en la desorción indican que el mecanismo de adsorción tuvo lugar mediante adsorción química y formación de complejos con los grupos funcionales en la superficie del biosorbente (Oré Jiménez, Lavado Meza, & Bendezú Monte, 2015). En consecuencia, el proceso de biosorción se basa en la adsorción química de los iones metálicos de Pb (II) y Ni (II), tal como se mencionó anteriormente. Sin embargo, como se pudo evidenciar, no se logró una desorción de los iones metálicos completa, esto puede atribuirse a que otros mecanismos que pueden estar involucrados en el proceso de adsorción como el intercambio iónico (Eliescu et al., 2020).

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

Se logró demostrar experimentalmente que es factible elaborar columnas, a escala de laboratorio, de 7 cm de alto, preparadas a partir de biomasa residual de 1 g de semilla y cáscara de aguacate (*Persea americana* Hass.), que presenta un tamaño de partícula de 600  $\mu\text{m}$  y con una porosidad de 0,683 g/mL; las cuales permiten la biosorción de soluciones de 25 mL de Pb (II) y Ni (II).

Los resultados indican que las columnas adsorbentes exhiben una buena capacidad de adsorción y los porcentajes obtenidos para la adsorción de plomo fueron mayores a 70% para concentraciones inferiores a 130 mg/L y los porcentajes obtenidos para la adsorción de níquel fueron mayores a 20% para concentraciones inferiores a 25 mg/L, valores que dependen en gran medida de la concentración inicial del metal.

La isoterma de Langmuir describió mejor los resultados de equilibrio para la eliminación de Pb (II) y Ni (II) que otras isotermas, por lo cual se trata de un proceso de quimisorción. Se obtuvo una capacidad máxima de adsorción de plomo de 2,5 mg/g para el proceso realizado mediante columnas elaboradas a partir de semilla y cáscara de aguacate pretratada con etanol y de níquel de 0,2 mg/g para el proceso realizado mediante columnas elaboradas a partir de semilla y cáscara de aguacate pretratada con etanol.

Las capacidades máximas de adsorción anteriormente detalladas son moderadamente más bajas que los de varios biosorbentes basados en biomasa correspondientes informados en la literatura. En consecuencia, las columnas elaboradas a partir de biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate son menos eficiente para la biosorción de plomo y níquel en soluciones acuosas.

La biosorción de níquel (II) mediante biomasa residual de semilla y cáscara de aguacate presenta un desempeño bajo, esto se puede demostrar ya que se presenta un factor de separación  $R_L$  mayor a 1, por lo cual como se observa en la tabla 2, se trata de un sistema isotérmico desfavorable.

Usando HCl 1 M, se obtuvo un porcentaje de desorción de plomo mayor al 85% y usando HCl 0,1 M, se obtuvo un porcentaje de desorción de níquel mayor al 75%, lo cual demuestra la regeneración y reutilización de las columnas adsorbentes mediante la protonación de los grupos funcionales. Los resultados obtenidos del porcentaje de desorción muestran que el mecanismo de adsorción tiene lugar a través de la adsorción química y formación de complejos entre el metal y los grupos funcionales en la superficie del biosorbente.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda continuar con los estudios, y que estos se realicen a una escala piloto que permitan trabajar con volúmenes mayores de biomasa y de soluciones.

Se recomienda realizar estudios de modificaciones químicas del biosorbente para evaluar si la adsorción de níquel mejora. Se sabe que la modificación de la mayoría de los adsorbentes ofrece un desempeño sobresaliente para la adsorción de metales pesados, ya que potencializa los grupos funcionales.

Se recomienda realizar estudios preliminares Batch o por lote, los cuales consisten en colocar una cantidad determinada de sorbente y solución contaminada en agitación hasta alcanzar el equilibrio. Esto para analizar la cinética de adsorción, el tiempo óptimo de contacto y el pH óptimo de trabajo.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, S. H., Ismail, I. M., Mostafa, T. M., & Sulaymon, A. H. (2014). Biosorption of Heavy Metals: A Review. *Journal of Chemical Science and Technology*, 3(4), 74–102. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/266795209>
- Aiyesanmi, A., Adebayo, M. A., Okoronkwo, A. E., & Ekujumi, O. (2022). Adsorption of Nickel (II) from Aqueous Solution Using *Leucaena leucocephala* Shells. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(8), 2755–2770. <https://doi.org/https://doi.org/10.30492/IJCCE.2022.141577.4447>
- 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>
- Aiyesanmi, A., Okoronkwo, A., & Akinmolayan, B. (2013). Equilibrium Sorption of Lead and Nickel from Solutions by Flame of the Forest (&lt;i>Delonix regia&lt;/i>) Pods: Kinetics and Isothermic Study. *Journal of Environmental Protection*, 04(03), 261–269. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.43031>
- ALLEONI, L. R. F., CAMARGO, O. A., & CASAGRANDE, J. C. (1998). Isotermas de langmuir e de freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola*, 55(3), 379–387. <https://doi.org/10.1590/s0103-90161998000300005>
- Álvarez Flores, J. J., Vite Cevallos, H., Garzón Montealegre, V. J., & Carvajal Romero, H. (2021). Análisis de la producción de aguacate en el Ecuador y su exportación a mercados internacionales en el periodo 2008 al 2018. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(1), 164–172. Recuperado de <https://orcid.org/0000-0003-4605-3709>
- Barrientos Álvarez, H. (2015). *BIOADSORCIÓN DE PLOMO (II) UTILIZANDO Baccharis latifolia (CHILCA)*" (Disertación de Grado). UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS , Peru.
- Bermejo Campos, D. F. (2016). *Remoción de plomo y cadmio presente en aguas residuales mineras mediante biosorción en columnas con bagazo de caña y cáscara de cacao* (Disertación de grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

- Bulut, Y., & Tez, Z. (2007). Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption. *Journal of Environmental Sciences*, 19(2), 160–166. Recuperado de [www.jesc.ac.cn](http://www.jesc.ac.cn)
- Cabrera Andrade, L. F. (2017). *Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara del tomate de árbol (Solanum betaceum)* (Disertación de gradi). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Cahuana, L., & Aduvire, O. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio ambiente y Minería*, 4(2), 19–36.
- Cardona Gutiérrez, A., Cabañas Vargas, D., & Zepeda Pedreguera, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1), 1–9.
- Carro de Diego, L. (2012). *Eliminación de Mercurio de efluentes acuosos con materiales de bajo coste: Proceso combinado de bioadsorción-reducción* (Tesis doctoral). Universidad de Coruña, La Coruña, España.
- Carter Martin, R. (1993). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (1a ed., Vol. 1). USA.
- Castellar Ortega, G. C., Cardozo Arrieta, B. M., Suarez Guerrero, J. F., & Vega Taboada, J. E. (2013). Adsorción por lote y en una columna de lecho fijo del colorante B39 sobre carbón activado granular. *Prospectiva*, 11(1), 66–75.
- Caviedes Rubio, D., Muñoz Calderón, R., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater. A Review. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73–90.
- Ceballos, A., & Montoya, S. (2013). EVALUACIÓN QUIMICA DE LA FIBRA EN SEMILLA PULPA Y CÁSCARA DE TRES VARIEDADES DE AGUACATE. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1), 103–112.
- Chil Núñez, I., Molina Beltrán, S., & Ortiz Zamora, L. (2019). Estado del Arte de la especie *Persea americana* Mill (aguacate). *AMAZONIA Investiga*, 8(21), 73–86. Recuperado de <https://orcid.org/0000-0002-8795-1217>
- Cox, J. S., Smith, D. S., Warren, L. A., & Ferris, F. G. (1999). Characterizing heterogeneous bacterial surface functional groups using discrete affinity spectra for proton binding. *Environmental Science and Technology*, 33(24), 4514–4521. <https://doi.org/10.1021/es9906271>

- Cuizano, N. A., & Navarro, A. E. (2008). Biosorción de metales pesados por algas marinas: Posible solución a la contaminación a bajas concentraciones. *Anales de Química*, 104(2), 120–125.
- Dávila Guzmán, N. E. (2012). *CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE BIOSORCIÓN DE METALES PESADOS MEDIANTE RESIDUOS SÓLIDOS DE CAFÉ* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Nueva León, Nuevo León, México.
- Driss Alami, S. (2010). *Aprovechamiento de hueso de aceituna biosorción de iones metálicos* (Tesis doctoral). Universidad de Granada, Granada, España.
- Eliescu, A., Georgescu, A. A., Nicolescu, C. M., Bumbac, M., Cioateră, N., Mureșeanu, M., & Buruleanu, L. C. (2020). Biosorption of Pb(II) from Aqueous Solution Using Mushroom (*Pleurotus ostreatus*) Biomass and Spent Mushroom Substrate. *Analytical Letters*, 53(14), 2292–2319. <https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1740722>
- Fernández Villalón, M., Calzado Lamela, O., Cascaret Carmenaty, D. A., & Pérez Silva, R. M. (2018). Factores de mayor influencia en la adsorción de metales pesados por biomasa seca de *Kluyveromyces Marxianus* CCEBI 2011. *Tecnología Química*, 38(2), 335–345.
- Fiol, N., Villaescusa, I., Martínez, M., Miralles, N., Poch, J., & Serarols, J. (2006). Sorption of Pb(II), Ni(II), Cu(II) and Cd(II) from aqueous solution by olive stone waste. *Separation and Purification Technology*, 50(1), 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.11.016>
- Gallegos, W., Vega, M., & Noriega, P. (2012). Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja*, 15(1), 18–25.
- Gálvez, R. A. (2016). *Preparación y aplicación de biosorbentes activados químicamente para la eliminación de plomo de medios acuosos* (Tesis doctoral, Universidad de Granada). Universidad de Granada, Granada, España.
- García Gonzales, R., Gómez Espinosa, R. M., Ávila Pérez, P., García Gaitán, B., García Rivas, J. L., & Zavala Arce, R. E. (2016). Estudio de Biosorción de Cu<sup>2+</sup> en el Criogel Quitosano-Celulosa. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(2), 311–322.
- Hernández, I., Vázquez, M., Jerónimo, J., & Sandoval, F. (2016). Biosorción de metales pesados mediante el uso de una biomasa microbiana, en aguas residuales. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 3(8), 10–14.

- Hernández López, V., Nájera Pérez, M., Cárdenas González, J. F., Martínez Juárez, V., & Acosta Rodríguez, I. (2020). Utilidad De La Cáscara De Aguacate (*Persea americana*) Para La Eliminación De Cromo (Vi) De Aguas Contaminadas. *TRANSVERSALIDAD CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA*, 4(1), 110–117.
- Hernández Mestanza, L. M., Majano Abrego, G. E. & Mira Martínez, E. A. (2019). Elaboración de un Material Biosorbente a partir de la Cáscara de Plátano (*Musa Sp.*) para ser utilizado en la remoción de Cromo VI proveniente de las aguas Residuales de la Industria de Curtiembre (Tesis de Grado). Universidad de El Salvador. El Salvador
- 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>
- Ihesinachi, K., & Eresiya, D. (2014). Evaluation of heavy metals in orange, pineapple, avocadopear and pawpaw from a farm in Kaani, Bori, Rivers State Nigeria. *International Research Journal of Public and Environmental Health*, 1(4), 87-94.
- Izquierdo Sanchís, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción : evaluación de materiales y modelación del proceso* (Tesis doctoral). Universitat de València, Valencia, España.
- Jiménez, J. G., Gelabert, R., & Brito, R. (2006). Toxic effects of nickel and zinc in *Artemia franciscana* (Crustacea: Branchiopoda: Anostraca). *Universidad y Ciencia*, 22(1), 65–74.
- Larenas Uría, C., & Andrango, D. (2008). Estudio isotérmico de biosorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales. *La Granja*, 8(2), 3–8.
- 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), 334. <https://doi.org/10.3390/ma11030334>
- Morocho Núñez, E. W., Ortega González, J. E., Cevallos Vizcaíno, E. M., & Manosalvas Sánchez, S. R. (2018). El aceite de aguacate Hass y su rentabilidad en el mercado. *Visión Empresarial*, 1(8), 121–130.
- Mqehe-Nedzivhe, K. C., Makhado, K., Olorundare, O. F., Arotiba, O. A., Makhatha, E., Nomngongo, P. N., & Mabuba, N. (2018). Bio-adsorbents for the Removal of Heavy Metals from Water. En *Arsenic - Analytical and Toxicological Studies*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73570>

- Muñiz Ugarte, C., Rodríguez, A., Montero Álvarez, A., Estévez Álvarez, J., de Aguiar Accioly, A., & Araujo Do Nascimento, C. (2015). Reseña bibliográfica EL NÍQUEL EN SUELOS Y PLANTAS DE CUBA. *Cultivos Tropicales*, 36(1), 25–33.
- 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>
- Oré Jiménez, F., Lavado Meza, C., & Bendezú Monte, S. (2015). BIOSORCIÓN DE Pb (II) DE AGUAS RESIDUALES DE MINA USANDO EL MARLO DE MAÍZ (*Zea mays*) BIOSORPTION OF LEAD PB (II) FROM RESIDUAL WATERS OF MINE BY CORNCOB (*Zea mays*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(2), 122–134.
- Romero Cano, L. A. (2013). *Preparación y uso de cáscaras de naranja como biosorbente para la remoción de compuestos orgánicos* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico en electroquímica., Santiago de Querétaro, México.
- Sanchez, E. L., Garza, T., Almaguer Cantú, V., Saenz, I., & Montes, A. L. (2008). Estudio cinético e isothermas de adsorción de Ni(II) y Zn(II) utilizando biomasa del alga *Chlorella sp.* inmovilizada. *Ciencia UANL*, 11(2), 168–176.
- Sánchez Quezada, V., & Loarca Piña, G. (2022). Caracterización química, fisicoquímica y nutracéutica de la semilla del aguacate (*Persea americana* Mill) para el uso en la industria. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 17(1), 297–303.
- 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. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23(1), 1–18. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>
- Setyawan, H. Y., Sukardi, S., & Puriwangi, C. A. (2021). Phytochemicals properties of avocado seed: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012090>
- Souza, R. S., Chaves, L. H. G., & Fernandes, J. D. (2007). Isothermas de Langmuir e de Freundlich na descrição da adsorção de zinco em solos do Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 2(2), 123–127.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012, 22nd. Ed., EUA, APHA-AWWA-WEF.

Tapia Maldonado, E., & Somme Márquez, A. (2021). *Adding value to avocado oil industry wastes: Textile wastewater treatment filters made up of activated carbon* (Tesis de Grado, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental YACHAY.). Universidad de Investigación de Tecnología Experimental YACHAY., Imbabura, Ecuador. Recuperado de [www.yachaytech.edu.ec](http://www.yachaytech.edu.ec)

Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, A., & Garcés Jaraba, L. (2014). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34), 109–123.

Vazquez Palma, D., Netzahuatl Muñoz, A. R., Pineda Camacho, G., & Cristiani Urbina, E. (2017). Biosorptive removal of nickel (II) ions from aqueous solutions by hass avocado (Persea Americana mill. Var. Hass) shell as an effective and low-cost biosorbent. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(5), 3501–3513. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/319348785>

Zamora Velazco, N. G. (2010). *Obtención de carbón activado a partir de semillas, de dos palmeras de la Amazonía Peruana, Shapaja (Atta/ea phalerta) y Aguaje (Mauritia flexuosa)* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

**9. FIGURAS**

**Figura 17. Molino empleado en la trituración de la biomasa**



**Figura 18. Proceso de tamizado de la biomasa**



**Figura 19. Proceso de filtración de la biomasa después del pretratamiento**



**Figura 20. Pesaje de las columnas**



**Figura 21. Proceso de percolación de soluciones a través de las columnas.**



**Figura 22. Estándar de níquel**



**Figura 23. Estándar de plomo**



**Figura 24. Mufla empleada en el análisis de cenizas**

## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Determinación de Humedad

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(51,9560 - 51,5740)}{5,0051} \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = 7,632$$

### Anexo 2. Determinación de ceniza

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(63,68 - 63,50)}{2,0191} \times 100$$

$$\% \text{ Cenizas} = 8,915$$

### Anexo 3. Densidad real

$$\rho_{real} = \frac{1,0065 \text{ g}}{10 \text{ mL} - \frac{8,9475 \text{ g}}{0,997 \text{ g/mL}}}$$

$$\rho_{real} = 0,981 \text{ g/mL}$$

### Anexo 4. Densidad aparente

$$\rho_{apt.} = \frac{36,3186 - 34,5198}{5,8}$$

$$\rho_{apt.} = 0,310$$

### Anexo 5. Porosidad

$$e = \frac{0,981 - 0,310}{0,981}$$

$$e = 0,683$$

**Anexo 6. Concentración de la muestra del análisis de plomo**

$$X = \frac{(0,0220 - (-0,01172))}{0,05104}$$

$$X = 0,660$$

$$mg \text{ metal/L} = 0,660 \times 1 = 0,660 \text{ mg/L}$$

**Anexo 7. Concentración de la muestra del análisis de níquel**

$$X = \frac{(0,000404 - (-0,00001))}{0,01180}$$

$$X = 0,343$$

$$mg \text{ metal/L} = 0,343 \times 1 = 0,343 \text{ mg/L}$$

**Anexo 8. Porcentaje de desorción**

$$\% \text{ Desorción} = \frac{0,937 \text{ mg/L}}{58,169 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$\% \text{ Desorción} = 1,610 \%$$

**Anexo 9. Preparación de HCl 0,01 M**

$$V_i = \frac{0,01 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \times \frac{36,26 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{100 \%}{37\%} \times \frac{1 \text{ ml}}{1,49 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times 500 \text{ mL}$$

$$V_i = 0,328 \text{ mL}$$

Se toman 328  $\mu\text{L}$  de HCl concentrado y se afora hasta 500 mL con agua tipo I

**Anexo 10. Preparación de HCl 1M**

$$V_i = \frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ L}} \times \frac{36,26 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{100 \%}{37\%} \times \frac{1 \text{ ml}}{1,49 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times 500 \text{ mL}$$

$$V_i = 32,885 \text{ mL}$$

Se toman 32,885 mL de HCl concentrado y se afora hasta 500 mL con agua tipo I

### Anexo 11. Curva de calibración de plomo

**Tabla 14. Absorbancia de curva de calibración de plomo**

Concentración [mg/L]	Absorbancia
0,0	0,0000
0,3	0,0042
1,0	0,0360
3,0	0,1467
5,0	0,2409
<b>R<sup>2</sup></b>	0,999343
<b>m</b>	0,05104
<b>b</b>	-0,01172

### Anexo 12. Curva de calibración de níquel

**Tabla 15. Absorbancia de curva de calibración de níquel**

Concentración [mg/L]	Absorbancia
0,0	0,0000
0,3	0,0034
1,0	0,0116
3,0	0,0356
5,0	0,0588
<b>R<sup>2</sup></b>	0,999971
<b>m</b>	0,01180
<b>b</b>	-0,00001