



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

APLICACIÓN DE MATERIALES DERIVADOS DEL RAQUIS DE  
BANANO PARA LA REMOCIÓN DE CROMO EN SOLUCIÓN ACUOSA

ALVAREZ AREVALO STALIN RENE  
INGENIERO QUÍMICO

MOLINA GOROZABEL JORGE ENRIQUE  
INGENIERO QUÍMICO

MACHALA  
2021



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

APLICACIÓN DE MATERIALES DERIVADOS DEL RAQUIS DE  
BANANO PARA LA REMOCIÓN DE CROMO EN SOLUCIÓN  
ACUOSA

ALVAREZ AREVALO STALIN RENE  
INGENIERO QUÍMICO

MOLINA GOROZABEL JORGE ENRIQUE  
INGENIERO QUÍMICO

MACHALA  
2021



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO TITULACIÓN  
TRABAJO EXPERIMENTAL

APLICACIÓN DE MATERIALES DERIVADOS DEL RAQUIS DE BANANO PARA LA  
REMOCIÓN DE CROMO EN SOLUCIÓN ACUOSA

ALVAREZ AREVALO STALIN RENE  
INGENIERO QUÍMICO

MOLINA GOROZABEL JORGE ENRIQUE  
INGENIERO QUÍMICO

AYALA ARMIJOS JOSE HUMBERTO

MACHALA, 26 DE ABRIL DE 2021

MACHALA  
2021

# Tesis

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

1 [sedici.unlp.edu.ar](http://sedici.unlp.edu.ar) <1 %  
Fuente de Internet

---

2 [bibliotecadigital.exactas.uba.ar](http://bibliotecadigital.exactas.uba.ar) <1 %  
Fuente de Internet

---

3 [www.aiqs.es](http://www.aiqs.es) <1 %  
Fuente de Internet

---

4 [www.coursehero.com](http://www.coursehero.com) <1 %  
Fuente de Internet

---

5 Submitted to Consorcio CIXUG <1 %  
Trabajo del estudiante

---

6 [www.scielo.org.pe](http://www.scielo.org.pe) <1 %  
Fuente de Internet

---

7 [documentop.com](http://documentop.com) <1 %  
Fuente de Internet

---

8 Submitted to Universidad Autónoma de  
Nuevo León <1 %  
Trabajo del estudiante

---

9 [documents.mx](http://documents.mx)  
Fuente de Internet

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, ALVAREZ AREVALO STALIN RENE y MOLINA GOROZABEL JORGE ENRIQUE, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado APLICACIÓN DE MATERIALES DERIVADOS DEL RAQUIS DE BANANO PARA LA REMOCIÓN DE CROMO EN SOLUCIÓN ACUOSA, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.


Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 26 de abril de 2021



ALVAREZ AREVALO STALIN RENE  
0706457306



MOLINA GOROZABEL JORGE ENRIQUE  
1311514713

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo y todo el esfuerzo realizado en el transcurso de la carrera a mis padres Leonor Sánchez y Joffre Álvarez, quienes estuvieron la mayoría del tiempo apoyándome para terminar mis estudios y poder llegar hasta el final, a mi hermana Juletsi por ser el motivo para seguir adelante y darle un mejor futuro, a mi tía Beatriz por brindarme su ayuda incondicional y ser un motor fundamental para mí, a mi abuela Flora quien en vida siempre confió en mí y que ahora se sentiría muy orgullosa de su nieto, y por ultimo a mi familia en general por aportar con su grano de arena en todo lo que me he propuesto.

**Stalin Rene Álvarez Arévalo**

Dedico mi trabajo de titulación a mis padres Mireya Gorozabel y Jorge Molina, los cuales han sido pilar en el transcurso de educación, a mi hermana Estefanía Molina por acompañarme en los momentos más difíciles y su ayuda incondicional.

**Jorge Enrique Molina Gorozabel**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco principalmente a mis padres por toda la ayuda que me brindaron al inicio, durante y final de esta etapa, dado que sin el apoyo de ellos jamás hubiera podido terminar mis estudios, a mi tía por ser parte esencial de este logro, a los docentes de la Universidad Técnica de Machala de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud que de alguna u otra manera fueron parte de mi formación académica, un agradecimiento especial a nuestro tutor de tesis por brindarnos todo el conocimiento y profesionalismo mostrado en el desarrollo del trabajo de titulación, como también a las Ing. Estefanía Molina e Ing. Tanya Carchi por todo el apoyo ofrecido durante el desarrollo de este trabajo.

**Stalin Rene Álvarez Arévalo**

Agradezco eternamente a mis padres por cada momento para continuar, como también a mi hermana Estefanía Molina la cual me apoyo incontables veces, a los docentes que ayudaron para mi formación académica.

Al Ing. Byron Iapo por su colaboración y apoyo en toda la elaboración de tesis, de igual manera agradecido con la Ing. Tanya Carchi.

**Jorge Enrique Molina Gorozabel**

## RESUMEN

La contaminación por metales pesados es preocupación mundial por su gran impacto en la sociedad y medio ambiente. El cromo representa un elemento importante dentro de los metales pesados dado que estas sustancias presentan la característica de no ser biodegradables, estos metaloides generan alteraciones físico – químicas dentro de ecosistemas donde sean segregados por la industrialización. En el Ecuador existe la polución a partir de las empresas que realizan el proceso de curtiembre, elaboración de ropa, calzado y papel, las cuales segregan lodos, cenizas, residuos líquidos, entre otros que contienen principalmente cromo hexavalente depositándose en suelo y agua.

Durante varios años se ha venido estudiando nuevos métodos y tecnologías para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos en el proceso de adsorción de metales pesados en fuentes hídricas. El objetivo de la presente investigación consiste en la aplicación de materiales derivados del raquis de banano como materiales adsorbentes para la remoción de cromo en soluciones acuosas. Los materiales derivados de desechos lignocelulósicos fueron elaborados a partir de raquis de banano, el cual fue reducido de tamaño, secado y posteriormente molido, como también tamizado obteniendo un tamaño de partícula de 250um.

Se obtuvieron cinco materiales bioadsorbentes: material insoluble en etanol (EIM), material insoluble en agua (WIM), material insoluble en etanol-agua (WEIM), pared celular secundaria (SCW) y celulosa. Para la elaboración de EIM, WIM se utilizó el extractor acelerado Dionex Ase 150, ya que estos materiales son necesarios para elaborar el WEIM, SCW y Celulosa. Para el proceso de caracterización de cada material se realizaron los siguientes estudios: determinación de extraíbles, holocelulosa, celulosa, hemicelulosa, lignina, potencial de carga cero, titulación boehm e infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR). Por otra parte, para el análisis de adsorción de cromo (Cr) se llevó a cabo varios estudios como: estudio de pH, isothermas de adsorción y cinética de adsorción.

El porcentaje de cada material obtenido del raquis de banano fueron los siguientes: EIM 14.92%, WIM 14.04%, WEIM 24.98%. SCW 27.93% y Celulosa 40.30%. En el proceso de determinación de extraíbles el material WEIM con 2.35% demostró una cantidad inferior a los demás, esto se debe a que para la elaboración de WEIM se utilizó como base



el materia insoluble de etanol (EIM) el cual ya ha sido anteriormente tratado para aislarlo del raquis de banano, en la determinación de holocelulosa el material WIM presento mayor porcentaje con el 60.34%, en la determinación de celulosa cuatro materiales presentaron porcentajes en un rango 40% a 45% mientras que el material celulosa el 90.55% demostrando la efectividad del método utilizado para aislarlo del raquis de banano y por último para la determinación de hemicelulosa se lo obtuvo por diferencia de holocelulosa y celulosa resultando el porcentaje en un rango de 14% a 18% para los cinco materiales.

A través de las pruebas de titulación Boehm se pudo identificar varios grupos funcionales como: lactónicos, fenólicos, hidroxilos y carboxílicos en los cinco materiales donde se obtuvo resultados de 2.5 mmol/g para EIM, WIM, WEIM, SCW en cantidad de grupos carboxílicos y 10mmol/g para celulosa, por otro lado el estudio de infrarrojos por transformadas de Fourier (FTIR) se lo realizó a una longitud de onda de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  presentando bandas relativamente similares en los picos 1591  $\text{cm}^{-1}$  y 772  $\text{cm}^{-1}$ ; atribuido a las vibraciones de los grupos funcionales carboxílicos  $\text{COO}^-$  y enlaces carbono-carbono  $\text{C} = \text{C}$  para el raquis de banano puro y el EIM. En el análisis del potencial de carga cero para los cinco materiales se obtuvieron los siguientes pH: 6.5 EIM, 5.7 WIM, 6.3 WEIM, 6.5 SCW y 8.5 Celulosa.

Para establecer el pH óptimo en la remoción cromo (Cr) se llevó a cabo con tres valores diferentes de pH (2, 3 y 5) para cada uno de los materiales aislados: EIM, WIM, WEIM, SCW y celulosa, resultando que el material EIM, SCW y celulosa tuvieron una mejor remoción a pH 2 mientras el material WEIM y WIM a un pH 3

La capacidad de adsorción de los cinco materiales fue evaluada mediante los isoterms de Langmuir y Freundlich, donde finalmente el modelo matemático que más se ajustó al equilibrio fue la ecuación Langmuir obteniéndose la capacidad máxima de adsorción de cada material: EIM con  $Q_{\text{max}} = 59.62 \text{ mg/g}$  y  $R^2 = 0.95$ , WIM con  $Q_{\text{max}} = 107.68 \text{ mg/g}$  y  $R^2 = 0.93$ , WEIM con  $Q_{\text{max}} = 55.56 \text{ mg/g}$  y  $R^2 = 0.95$ , SCW con  $Q_{\text{max}} = 37.85 \text{ mg/g}$  y  $R^2 = 0.95$ , Celulosa con  $Q_{\text{max}} = 69.3 \text{ mg/g}$  y  $R^2 = 0.97$ . Por otro lado, de acuerdo a los resultados de las isoterms únicamente se procedió a realizar la cinética de adsorción con el material WIM dado que este presentó un mejor comportamiento que los demás, donde el modelo matemático Pseudo primer orden fue el que mejor se ajustó a los resultados obtenidos con  $q_e = 71.37 \text{ mg/g}$  y un  $R^2 = 0.94$  para el material insoluble en agua (WIM).

La investigación ejecutada en este trabajo demuestra que la aplicación de materiales adsorbentes derivados del raquis de banano es eficiente para la remoción de cromo (Cr) en solución acuosa, principalmente el material WIM que presenta un mejor comportamiento en comparación a otros materiales bioadsorbentes que requieren procesos más complejos y costosos

**Palabras claves:** Polución, Adsorbente, Cromo Hexavalente, Langmuir, Freundlich, Isotermas, Cinética, Titulación Boehm.

## ABSTRACT

Pollution by heavy metals is a worldwide concern due to its great impact on society and the environment. Chromium represents an important element within heavy metals since these substances are non-biodegradable, these metalloids generate physical-chemical alterations in ecosystems where they are segregated by industrialization. In Ecuador, pollution is caused by tanneries, clothing, footwear and paper manufacturing companies, which release sludge, ashes, liquid waste, among others, that contain mainly hexavalent chromium and are deposited in soil and water.

For several years, new methods and technologies have been studied for the use of lignocellulosic wastes in the process of adsorption of heavy metals in water sources. The objective of this research is the application of materials derived from banana rachis as adsorbent materials for the removal of chromium in aqueous solutions. The materials derived from lignocellulosic wastes were elaborated from banana rachis, which was reduced in size, dried and subsequently ground, as well as sieved to obtain a particle size of 250 $\mu$ m.

Five bioadsorbent materials were obtained: ethanol-insoluble material (EIM), water-insoluble material (WIM), water-ethanol-insoluble material (WEIM), secondary cell wall (SCW) and cellulose. The accelerated extractor Dionex Ase 150 was used for the elaboration of EIM, WIM, as these materials are necessary to elaborate WEIM, SCW and Cellulose. For the characterization process of each material, the following studies were carried out: determination of extractables, holocellulose, cellulose, hemicellulose, lignin, zero charge potential, boehm titration and Fourier transform infrared (FTIR). On the other hand, for the analysis of chromium (Cr) adsorption, several studies were carried out, such as: pH study, adsorption isotherms and adsorption kinetics.

The percentage of each material obtained from banana rachis were as follows: EIM 14.92%, WIM 14.04%, WEIM 24.98%. SCW 27.93% and Cellulose 40.30%. In the process of determination of extractables, the WEIM material with 2.35% showed a lower quantity than the others, this is due to the fact that for the elaboration of WEIM the ethanol insoluble matter (EIM) was used as a base, which has already been previously treated to isolate it from the banana rachis, in the determination of holocellulose the WIM material presented a higher percentage with 60.34%, in the determination of cellulose four

materials presented percentages in a range of 40% to 45% while the cellulose material presented 90.55% demonstrating the effectiveness of the method used to isolate it from the banana rachis and finally for the determination of hemicellulose it was obtained by difference of holocellulose and cellulose resulting in a percentage in a range of 14% to 18% for the five materials.

Through the Boehm titration tests it was possible to identify several functional groups such as: lactonic, phenolic, hydroxyl and carboxylic groups in the five materials where results were obtained from 2.5 mmol/g for EIM, WIM, WEIM, SCW in quantity of carboxylic groups and 10 mmol/g for cellulose, on the other hand, the Fourier transform infrared study (FTIR) was carried out at a wavelength of 500 to 4000  $\text{cm}^{-1}$  presenting relatively similar bands in the peaks 1591  $\text{cm}^{-1}$  and 772  $\text{cm}^{-1}$ ; attributed to the vibrations of the carboxylic functional groups  $\text{COO}^-$  and carbon-carbon bonds  $\text{C} = \text{C}$  for the pure banana rachis and EIM. In the analysis of the zero charge potential for the five materials, the following pH were obtained: 6.5 EIM, 5.7 WIM, 6.3 WEIM, 6.5 SCW and 8.5 Cellulose.

To establish the optimum pH for chromium (Cr) removal, three different pH values (2, 3 and 5) were used for each of the isolated materials: EIM, WIM, WEIM, SCW and cellulose, resulting that EIM, SCW and cellulose had better removal at pH 2 while WEIM and WIM had better removal at pH 3.

The adsorption capacity of the five materials was evaluated by means of Langmuir and Freundlich isotherms, where finally the mathematical model that best fit the equilibrium was the Langmuir equation, obtaining the maximum adsorption capacity of each material: EIM with  $Q_{\text{max}} = 59.62 \text{ mg/g}$  and  $R^2 = 0.95$ , WIM with  $Q_{\text{max}} = 107.68 \text{ mg/g}$  and  $R^2 = 0.93$ , WEIM with  $Q_{\text{max}} = 55.56 \text{ mg/g}$  and  $R^2 = 0.95$ , SCW with  $Q_{\text{max}} = 37.85 \text{ mg/g}$  and  $R^2 = 0.95$ , Cellulose with  $Q_{\text{max}} = 69.3 \text{ mg/g}$  and  $R^2 = 0.97$ . On the other hand, according to the results of the isotherms, only the adsorption kinetics was performed with the WIM material since it presented a better behavior than the others, where the Pseudo first order mathematical model was the one that best adjusted to the results obtained with  $q_e = 71.37 \text{ mg/g}$  and an  $R^2 = 0.94$  for the water insoluble material (WIM).

The research carried out in this work demonstrates that the application of adsorbent materials derived from banana rachis is efficient for the removal of chromium (Cr) in aqueous solution, mainly the WIM material that presents a better performance compared to other bioadsorbent materials that require more complex and expensive processes.

**Keywords:** Pollution, Adsorbent, Hexavalent Chromium, Langmuir, Freundlich, Isotherms, Kinetics, Boehm Titration.

## INDICE

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO .....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT .....	VI
INDICE DE GRAFICOS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INDICE DE DIAGRAMAS.....	XIV
INDICE DE ANEXOS .....	XV
PROBLEMÁTICA.....	3
JUSTIFICACIÓN .....	4
1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. Metales Pesados .....	6
1.1.2. Contaminación del suelo por metales pesados .....	6
1.2. Cromo.....	6
1.2.1. Aplicaciones .....	7
1.2.2. Problemas ambientales.....	7
1.2.3. Riesgos en la salud .....	8
1.2.4. Problemas de cromo en el Ecuador .....	8
1.2.5. Límites máximos permisibles de cromo total y cromo hexavalente .....	8
1.2.6. Tratamiento para la remoción de cromo en fuentes hídricas y residuos industriales .....	9
1.3. Residuos lignocelulósicos .....	10
1.3.1. Pretratamientos de residuos lignocelulósicos.....	10
1.3.1.1. Pretratamiento mecánico.....	10
1.3.1.2. Pretratamiento térmico.....	10
1.3.1.3. Pretratamiento con vapor .....	10
1.3.1.4. Pretratamiento con agua caliente.....	11
1.3.1.5. Pretratamiento con ácido.....	11
1.4. Raquis de banano .....	11
1.4.1. Composición química .....	11
1.4.1.1. Pared celular .....	12
1.4.1.2. Celulosa .....	12
1.4.1.3. Hemicelulosa .....	13

1.4.1.4.	Lignina.....	13
1.4.1.5.	Pared celular secundaria .....	13
1.4.1.6.	Aplicación como material adsorbente .....	13
1.5.	Adsorbentes .....	13
1.5.1.	<i>Bioadsorbentes</i> .....	14
1.6.	Titulación Boehm .....	14
1.7.	Punto de carga cero (pzc) .....	15
1.8.	Estudios de adsorción.....	15
1.8.1.	<i>Fisorción y quimisorción</i> .....	16
1.8.2.	<i>Parámetros de adsorción.</i> .....	16
1.8.3.	<i>Isotermas de adsorción</i> .....	17
1.8.3.1.	Isoterma de Langmuir .....	17
1.8.3.2.	Isoterma de Freundlich.....	17
1.8.4.	<i>Cinética de adsorción</i> .....	18
2.	CAPITULO II: METODOLOGÍA.....	19
2.1.	Tipo de investigación.....	19
2.2.	Recolección de la muestra.....	19
2.3.	Ubicación de la Investigación.....	19
2.4.	Desarrollo Experimental.....	19
2.4.1.	<i>Preparación de la muestra</i> .....	19
2.4.2.	<i>Proceso de aislamiento de materiales</i> .....	20
2.4.2.1.	Material insoluble en etanol (EIM).....	20
2.4.2.2.	Material insoluble en agua (WIM).....	22
2.4.2.3.	Material insoluble en Etanol-Agua (WEIM) .....	23
2.4.2.4.	Pared celular secundaria (SCW).....	24
2.4.2.5.	Celulosa .....	25
2.4.3.	<i>Caracterización del material</i> .....	26
2.4.3.1.	Extraíbles .....	26
2.4.3.2.	Holocelulosa .....	27
2.4.3.3.	Celulosa .....	27
2.4.3.4.	Hemicelulosa .....	28
2.4.3.5.	Titulación Boehm .....	28
2.4.3.6.	Potencial de carga cero .....	28
2.4.4.	<i>Estudio de pH</i> .....	28
2.4.5.	<i>Isotermas de absorción</i> .....	29
2.4.6.	<i>Cinética de absorción</i> .....	29

2.5.	<b>Materiales, reactivos y equipos</b> .....	30
2.5.1.	<i>Materiales</i> .....	30
2.5.2.	<i>Reactivos</i> .....	30
2.5.3.	<i>Equipos</i> .....	31
3.	<b>CAPITULO III: RESULTADOS</b> .....	32
3.1.	<b>Aislamiento de materiales lignocelulósicos</b> .....	32
3.1.1.	<i>Material insoluble en etanol (EIM)</i> .....	32
3.1.2.	<i>Material insoluble en agua (WIM)</i> .....	32
3.1.3.	<i>Material insoluble en etanol-agua (WEIM)</i> .....	33
3.1.4.	<i>Pared celular secundaria (SCW)</i> .....	33
3.1.5.	<i>Celulosa</i> .....	34
3.1.6.	<i>Composición del Raquis de Banano</i> .....	34
3.2.	<b>Caracterización del material lignocelulósico</b> .....	35
3.2.1.	<i>Determinación de Extraíbles</i> .....	35
3.2.2.	<i>Determinación de Holocelulosa</i> .....	36
3.2.3.	<i>Determinación de Celulosa</i> .....	37
3.2.4.	<i>Determinación de Hemicelulosa</i> .....	38
3.2.5.	<i>Determinación de Lignina</i> .....	38
3.2.6.	<i>Titulación Boehm</i> .....	39
3.2.7.	<i>Potencial de carga cero (pH<sub>pzc</sub>)</i> .....	40
3.2.8.	<i>Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	42
3.3.	<b>Estudio de pH</b> .....	43
3.4.	<b>Estudio de equilibrio</b> .....	44
3.4.1.	<i>Isoterma de Material Insoluble en Etanol (EIM)</i> .....	45
3.4.2.	<i>Isoterma de Material Insoluble en Agua (WIM)</i> .....	45
3.4.3.	<i>Isoterma de Material Insoluble en Etanol-Agua (WEIM)</i> .....	46
3.4.4.	<i>Isoterma de Pared Celular Secundaria (SCW)</i> .....	47
3.4.5.	<i>Isoterma de Celulosa</i> .....	48
3.5.	<b>Cinética de adsorción de cromo (Cr)</b> .....	51
4.	<b>CAPITULO IV: CONCLUSIONES</b> .....	53
5.	<b>CAPITULO V: RECOMENDACIONES</b> .....	54
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	55
	<b>ANEXOS</b> .....	64



## INDICE DE GRAFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Estructura del material lignocelulósico.....	12
<b>Gráfico 2.</b> Composición del raquis de banano puro .....	34
<b>Gráfico 3.</b> Porcentaje de extraíbles en los bioadsorbentes .....	35
<b>Gráfico 4.</b> Porcentaje de holocelulosa en los bioadsorbentes.....	36
<b>Gráfico 5.</b> Porcentaje de celulosa en los bioadsorbentes.....	37
<b>Gráfico 6.</b> Porcentaje de hemicelulosa en los bioadsorbentes.....	38
<b>Gráfico 7.</b> Porcentaje de lignina en los bioadsorbentes.....	39
<b>Gráfico 8.</b> Potencial de carga cero de los bioadsorbentes .....	41
<b>Gráfico 9.</b> Longitud de onda y transmitancia de los bioadsorbentes.....	42
<b>Gráfico 10.</b> Efecto del pH en la capacidad de adsorción de los bioadsorbentes .....	44
<b>Gráfico 11.</b> Isoterma de EIM.....	45
<b>Gráfico 12.</b> Isoterma de WIM .....	46
<b>Gráfico 13.</b> Isoterma de WEIM.....	47
<b>Gráfico 14.</b> Isoterma de SCW .....	47
<b>Gráfico 15.</b> Isoterma de Celulosa .....	48
<b>Gráfico 16.</b> Cinética de cromo (Cr) en WIM .....	51

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Límites máximos permisibles en la calidad del agua. ....	8
<b>Tabla 2.</b> Porcentaje de extraíbles en etanol .....	32
<b>Tabla 3.</b> Porcentaje de extraíbles en agua .....	32
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje de extraíbles en etanol-agua .....	33
<b>Tabla 5.</b> Porcentaje de pared celular en EIM .....	33
<b>Tabla 6.</b> Porcentaje de celulosa en WEIM .....	34
<b>Tabla 7.</b> Titulación Boehm de los bioadsorbentes.....	40
<b>Tabla 8.</b> Resultados generales de las isotermas para Cromo (Cr) .....	49
<b>Tabla 9.</b> Cuadro comparativo de diferentes materiales bioadsorbentes para adsorción Cromo (Cr). ....	50
<b>Tabla 10.</b> Parámetros de los modelos cinéticos ajustados para el Cromo (Cr) .....	52

## INDICE DE DIAGRAMAS

<b>Diagrama 1.</b> Flujo del proceso de preparación de la muestra .....	20
<b>Diagrama 2.</b> Flujo del proceso para asilamiento del EIM.....	21
<b>Diagrama 3.</b> Flujo del proceso para asilamiento del WIM .....	22
<b>Diagrama 4.</b> Flujo del proceso para asilamiento del WEIM.....	23
<b>Diagrama 5.</b> Flujo del proceso para asilamiento de la SCW .....	24
<b>Diagrama 6.</b> Flujo del proceso para asilamiento de la celulosa .....	25

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Troceado de raquis de banano .....	64
<b>Anexo 2.</b> Material Insoluble en Etanol .....	64
<b>Anexo 3.</b> Material Insoluble en Agua .....	65
<b>Anexo 4.</b> Material Insoluble en Etanol-Agua .....	65
<b>Anexo 5.</b> Pared Celular Secundaria .....	66
<b>Anexo 6.</b> Celulosa.....	66
<b>Anexo 7.</b> Reactivos de aislamiento .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS

Cr (III)	Cromo trivalente
Cr (VI)	Cromo Hexavalente
EIM	Material Insoluble en Etanol
WIM	Material Insoluble en Agua
WEIM	Material Insoluble en Etanol-Agua
SCW	Pared Celular Secundaria
DMSO	Dimetil Sulfoxido
TULSMA Ambiente	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
OMS	Organización Mundial de la Salud
PPM	Partes por millón

## INTRODUCCIÓN

La contaminación a partir de metales pesados o metaloides es un asunto que se lleva debatiendo desde hace algunos años en el sector ambiental; la explotación de minerales, industrias de aparatos eléctricos y el sector automovilísticos son los principales causantes de esta problemática ambiental<sup>1</sup>. La polución por metales pesados genera alteraciones físicas – químicas de suelo y fuentes hídricas, principalmente a partir de su deposición; en la actualidad existen diversos métodos donde se aplica tratamientos específicos para metales que están presentes en soluciones acuosas como: precipitación química, intercambio iónico, ultrafiltración, ósmosis inversa y adsorción. Sin embargo, estos métodos tienen algunas limitaciones debido a la producción de residuos secundarios, gran cantidad de formación de lodos y alto costo operativo<sup>2</sup>.

El cromo es un metal pesado presente en diferentes estados de oxidación, los más importantes por el impacto y estabilidad ambiental son el cromo trivalente ( $\text{Cr}^{+3}$ ) como también el cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ). El cromo hexavalente es la especie más peligrosa y carcinogénica donde la combinación con oxígeno forma cromatos y dicromatos. En presencia de materia orgánica el cromo (VI) se reduce a trivalente, como también a niveles elevados que superan la capacidad reductora y continua como contaminante<sup>3</sup>.

El cromo (III) está presente en las industrias principalmente en curtidos de pieles donde se utiliza el sulfato de cromo  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  como agente curtidor y con opciones de oxidarse a cromo (VI), naturalmente como mineral cromita ( $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$ ) utilizado como material de construcción de hornos industriales y en el sector de colorantes y pigmentos. El contacto de cromo (VI) con el ecosistema o seres humanos causa la bioacumulación entre otras afecciones ya que es carcinogénico con límite permisible de 0,05 mg/l, como también alterando la vida acuática en fuentes hídricas y alteran el suelo<sup>4</sup>.

Para la recuperación de metaloides o metales pesados son empleados los materiales lignocelulósicos, los cuales son obtenidos comúnmente del sector agrícola para la producción de biocombustible, pero también existe la aplicación de estos como bioadsorbentes, principalmente el raquis de banano que se lo aplica para la recuperación de metales pesados por su alta eficiencia.<sup>5</sup>

La bioadsorción ha sido aplicada en las últimas décadas como una técnica amigable con el medio ambiente por su alta efectividad en los procesos de recuperación de minerales en agentes contaminantes<sup>6</sup>. Una opción se basa en la aplicación de residuos lignocelulósicos en el ámbito ecológico, por causa de que estas biomásas son aprovechadas a partir de residuos orgánicos provenientes del sector agrícola <sup>7</sup>. El raquis de banano o tallo floral es un residuo agroindustrial en la provincia de El Oro, precisamente por su alto índice de producción en Ecuador, éste desecho agroindustrial no es utilizado de forma adecuada, por otra parte, para obtener beneficios de los componentes que contiene el raquis de banano se utilizan técnicas de producción química - enzimática con el objetivo de separar diferentes materiales como pared celular y celulosa, las mismas que se aplican como agentes adsorbentes en el proceso de recuperación de metales pesados en soluciones acuosas<sup>8</sup>.

Por todo lo antes expuesto, se plantea como objetivo de esta investigación la obtención de diferentes materiales derivados de desechos lignocelulósicos aplicando procesos de aislamiento a partir del raquis de banano con el fin de utilizarlos como materiales adsorbentes para la recuperación de cromo (Cr) en soluciones acuosas.

## PROBLEMÁTICA

El cromo es uno de los contaminantes ambientales más comunes debido a las características que presenta, al ser un metal pesado no es biodegradable y, por lo tanto, resulta de gran preocupación a nivel mundial. El cromo Cr tiene diversas aplicaciones industriales debido a su dureza y calidad resistente a la corrosión. Se utiliza a gran escala en diversas industrias, incluidas la metalúrgica, la galvanoplastia, el curtido, la conservación de la madera, la fabricación de acero inoxidable, la producción de pinturas, pigmentos, pulpa y papel<sup>9</sup>.

El cromo ingresa al cuerpo a través de la respiración, la alimentación, la bebida o el contacto con la piel del cromo y sus compuestos. Los efectos tóxicos del Cr (VI) incluyen erupciones cutáneas, hemorragia nasal, infección del tracto respiratorio, sistema inmunológico debilitado, enfermedades hepáticas y cáncer de pulmón. Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) se ha catalogado al cromo como un contaminante ambiental prioritario por su carcinogenicidad, persistencia y bioacumulación lo cual representa un riesgo para los ecosistemas naturales y la salud humana<sup>10</sup>.

En el Ecuador existen muchos inconvenientes con empresas y microempresas dedicadas al proceso de curtiembre, elaboración de ropa, calzado y papel, las descargas de estas industrias como, por ejemplo: residuos líquidos, lodos, cenizas, volantes, escoria, etc. son una fuente importante de Cr (VI) en el medio ambiente sobre todo en las fuentes hídricas y en el suelo. Con el tiempo ha habido un aumento en la concentración total de Cr y otros metales pesados como el plomo y manganeso según el Instituto Nacional de Riego (INAR)<sup>11</sup>.



## JUSTIFICACIÓN

Con el tiempo se han venido desarrollando varios métodos de tratamiento convencionales para eliminar el Cromo (Cr) de las aguas residuales entre las cuales están la precipitación química, intercambio iónico, electrocoagulación, separación por membranas, sin embargo los costos de mantenimiento y operación son muy elevados y afectan la eficiencia y eficacia de estos procesos, aún más cuando se trabaja con grandes volúmenes de efluentes con concentraciones muy bajas<sup>12</sup>.

La bioadsorción es una técnica muy eficaz y con muchos beneficios debido a que es un método sencillo y simple para eliminar metales pesados de fuentes hídricas. Últimamente, varios investigadores han llevado a cabo una variedad de experimentos utilizando materiales lignocelulósicos como adsorbentes eficientes procedentes de la actividad bananera con el objetivo de establecer nuevas alternativas de aprovechamiento más económico en contraste con otros adsorbentes de mayor costo como el carbón activado<sup>2</sup>.

El banano es uno de los productos de mayor exportación e importación a nivel mundial, alrededor de 140 países entre ellos Ecuador son los principales generadores de este cultivo. La cantidad global de producción de banano asciende a 150 millones de toneladas, sin embargo, durante la cosecha y empaque del mismo se generan diversos residuos como el tallo, pseudo tallo y raquis que no son debidamente aprovechados, en contraste a lo mencionado anteriormente varios grupos de investigación han tratado de darle un aprovechamiento para la eliminación de metales, por tal razón el objetivo de este trabajo es aplicar diferentes materiales derivados del raquis de banano para la recuperación de cromo de soluciones acuosas<sup>13</sup>.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Aplicar materiales derivados del raquis de banano como adsorbentes para la remoción de cromo (Cr) en soluciones acuosas.

### **Objetivos específicos**

- Obtener los materiales derivados a partir del raquis de banano.
- Caracterizar los materiales derivados del raquis de banano para el estudio de su estructura física y química.
- Determinar la capacidad de adsorción de los materiales derivados del raquis de banano a través de isotermas de adsorción.
- Comparar la capacidad de adsorción de los materiales adsorbentes obtenidos para la remoción de cromo (Cr).

## 1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

### 1.1. Metales Pesados

El concepto de metales pesados se lo puede agrupar dentro de aquellos metales que tienen un número atómico mayor a de 20, como también peso específico de  $5 \text{ g/cm}^3$ . Al encontrarse inmersos en el medio ambiente contaminan directamente las fuentes hídricas como también suelo, por consiguiente, va afectando la flora y la fauna que lo rodea.

Entonces estos efectos que ocasionan los metales pesados en la bioquímica a partir de alimentos o contacto directo con el suelo y el agua, y además, la bioacumulación en los seres vivos, y por ende el impacto social y de salud que causan, es motivo suficiente para el estudio de la adsorción de los mismos.

#### *1.1.1. Contaminación del agua por metales pesados*

Los metales pesados son elementos que se pueden encontrar en las aguas residuales, que por lo general son procedentes de diferentes sectores industriales, estas aguas residuales desembocan en fuentes hídricas naturales, provocando afecciones de manera directa hacia la flora y la fauna acuática y, alterando su estado físico y químico, es por esta razón la importancia en su tratamiento para la remoción de estos contaminantes<sup>14</sup>.

#### *1.1.2. Contaminación del suelo por metales pesados*

La contaminación de suelos a partir de los metales pesados es la continuación de la polución en agua, ya que se filtra hacia el suelo que posteriormente afecta a la flora debido a que ciertas plantas son bioacumuladoras, lo cual la secuencia seguiría en la ingestas de las mismas por herbívoros que acumulan estos metaloides causando problemas en su salud<sup>15</sup>.

### 1.2. Cromo

El cromo es un metal con numerosas aplicaciones en la industria, como tal es contaminante de suelo y agua. El cromo hexavalente es la especie más carcinogénica donde la combinación con oxígeno forma cromatos y dicromatos. En presencia de materia

orgánica el cromo (VI) se reduce a trivalente, como también a niveles elevados superan la capacidad reductora y continua como contaminante<sup>16</sup>.

La contaminación por cromo en el Ecuador se basa en niveles elevados en la industria de curtidos, los cuales segregando contaminantes hacia aguas residuales y posteriormente desembocando en fuentes hídricas, filtrándose directamente hacia el suelo.

### ***1.2.1. Aplicaciones***

El cromo (Cr) por las características que presenta es utilizado en diversas industrias como galvanoplastia, refinación de metales, pinturas, pigmentos y en el curtido de cuero. Sin embargo, el 92.5% de la aplicación del cromo radica en una aleación denominada ferrocromo, la cual se usa para la fabricación del acero, dado que el cromo ofrece propiedades resistentes a la corrosión<sup>17</sup>.

Otro sector conocido donde se aplica el cromo es en las industrias de la curtiduría, generalmente se utiliza un compuesto llamado sulfato de cromo básico para el curtido mineral del cuero produciendo prendas de vestir de buena calidad<sup>18</sup>.

### ***1.2.2. Problemas ambientales***

En la actualidad las fuentes hídricas han sido las más perjudicadas por los residuos de la actividad industrial, la contaminación del agua por iones de cromo cada día es más evidente y grave para el ecosistema<sup>19</sup>.

El cromo se encuentra naturalmente en rocas y suelos como también en plantas y animales en concentraciones mínimas o trazas por lo cual no resultan un problema para alterar el equilibrio ecológico, sin embargo, en cantidad excesivas pueden ser extremadamente tóxicos principalmente cuando el cromo se presenta en estado trivalente. Las actividades antropogénicas son los principales causantes de la contaminación del agua a través de los residuos de procesos de teñido, curtidos de cueros, industrias del acero, conservantes<sup>20</sup>.

Las altas concentraciones de cromo en las plantas puede alterar la fotosíntesis dado que afecta actividades como la fijación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y procesos enzimáticos, sin embargo aún no se sabe a ciencia cierta hasta qué punto puede influir en todos estos aspectos<sup>21</sup>.

### ***1.2.3. Riesgos en la salud***

El riesgo que supone el cromo en la salud de las personas es de suma importancia para las organizaciones mundiales y agencias sanitarias por tal motivo la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) ha declarado los compuestos de cromo  $\text{Cr}^{+6}$  como contaminantes de clase A, eso quiere decir que pueden causar problemas en nivel dermatológico, enfermedades gastrointestinales y alto riesgo carcinogénico<sup>22</sup>.

Existen diversos estudios de carácter epidemiológico a nivel mundial que demuestran una relación directa entre la exposición a largo plazo de  $\text{Cr}^{+3}$  y  $\text{Cr}^{+6}$  y el cáncer de pulmón, los análisis fueron llevados a cabo a trabajadores en la producción de compuestos a base de cromatos y pigmentos, confirmando un riesgo eminente a la exposición principalmente de  $\text{Cr}^{+6}$ <sup>23</sup>.

### ***1.2.4. Problemas de cromo en el Ecuador***

En el Ecuador una de las causas principales de la contaminación de los recursos hídricos por cromo es la industria del curtido, durante el proceso de tratamiento utilizan un agente denominado sulfato de cromo. Por otro lado también existe la actividad minera que en sus drenajes eliminan pequeñas trazas de cromo que luego se bioacumulan como sedimentos y posteriormente se desplazan hacia el suelo<sup>11</sup>.

### ***1.2.5. Límites máximos permisibles de cromo total y cromo hexavalente***

En la tabla 1 se puede observar los límites máximos permisibles de cromo total y  $\text{Cr}^{+6}$  respecto a la calidad de los diferentes cuerpos de agua de acuerdo con Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua:

**Tabla 1.** Límites máximos permisibles en la calidad del agua.

Descargas	Parámetro	
	Cromo Total	$\text{Cr}^{+6}$
Aguas de consumo humano y uso doméstico- tratamiento convencional	-	0,05 mg/l

**Tabla 1.** (Continuación)

Aguas de consumo humano y uso doméstico- requieran desinfección	-	0,05 mg/l
Preservación de la flora y fauna	0,05 mg/l	-
Aguas subterráneas	16 ug/l	-
Aguas de uso agrícola	-	0,1 mg/l
Cuerpos de agua dulce	-	0,5 mg/l
Cuerpos de agua marina	-	0,5 mg/l

**FUENTE:** Elaborado por TULSMA<sup>24</sup>.

#### ***1.2.6. Tratamiento para la remoción de cromo en fuentes hídricas y residuos industriales***

Los compuestos de cromo son de gran utilidad industrial por tal motivo producen grandes volúmenes de efluentes contaminados, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el límite máximo permisible de cromo (VI) en agua potable es de 0.05 mg. En la actualidad existe un tratamiento convencional de 4 pasos para la remoción de cromo en cuerpos de agua:

- Reducción de Cr (VI) a Cr (III)
- Precipitación de Cr (III) como Cr(OH)<sub>3</sub> a pH's altos
- Asentamiento del hidróxido de metal insoluble
- Eliminación de lodos deshidratados<sup>25</sup>.

Las principales deficiencias del tratamiento convencional incluyen el alto costo de la eliminación segura del lodo, costosos productos químicos necesarios para la reducción de Cr (VI) y la reducción incompleta de Cr (VI). Las aguas residuales que contienen concentraciones relativamente bajas de Cr (VI) suelen ser tratados con resinas de intercambio iónico, que ofrecen la ventaja de la recuperación de ácido crómico pero a un alto costo de materia prima<sup>25</sup>.

### **1.3. Residuos lignocelulósicos**

Los residuos lignocelulósicos se producen de forma excesiva todos los años a través de industrias forestales o agrícolas, basura doméstica y distribución a gran escala. La eliminación de éstos desechos es el principal problema, debido a su almacenamiento inadecuado y, probablemente gran parte del material de desecho de origen vegetal (biomasa lignocelulósica) se elimine mediante la quema<sup>26</sup>.

En los últimos años, los residuos lignocelulósicos han atraído mucho interés debido al aumento de los problemas económicos, sociales y ambientales, el cambio climático global y el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles. Por otro lado, tienen un potencial económico muy importante y pueden aplicarse en varios sectores estratégicos, debido a las diversas características que poseen como: su área de la superficie, la estructura porosa y la aparición de muchos compuestos químicos (es decir, grupos carboxilo, amino, tiol, hidroxilo y fosfato)<sup>27</sup>.

#### ***1.3.1. Pretratamientos de residuos lignocelulósicos***

##### ***1.3.1.1. Pretratamiento mecánico***

El pretratamiento mecánico consiste en la reducción de partículas con el objetivo de reducción de la cristalización, esto lleva a un aumento a la minimización del grado de polimerización como también de superficie. El incremento de superficie específica, el corte y reducción de polimerización son factores a tomar en cuenta, ya que permiten el aumento en el rendimiento de la hidrólisis del material lignocelulósica <sup>28</sup>.

##### ***1.3.1.2. Pretratamiento térmico***

El pretratamiento térmico tiene como objetivo calentar el material lignocelulósico a temperaturas mayores de 150° a 180°C donde la hemicelulosa y lignina empiezan a solubilizarse por acción térmica. Por parte de la reacción térmica la hemicelulosa se hidroliza y forma ácidos los cuales siguen catalizando la hidrólisis <sup>29</sup>.

##### ***1.3.1.3. Pretratamiento con vapor***

El objetivo del pretratamiento con vapor de agua sobre el material lignocelulósico es poder solubilizar a la hemicelulosa y dar paso a la hidrólisis enzimática para poder evitar la formación de inhibidores. El proceso se lo realiza a temperatura y presión elevada (240°C)<sup>6</sup>.

#### **1.3.1.4. Pretratamiento con agua caliente**

El objetivo del tratamiento con agua caliente es idéntico al de vapor de agua, ya que se busca la solubilización de la hemicelulosa. En este tratamiento para evitar la formación de inhibidores el pH debe ser constante en un rango de 4 a 7 durante el pretratamiento, para mantener el rango y poder reducir las formaciones de monosacáridos como también la formación de productos que puedan degradar, los cuales pueden continuar catalizando la hidrólisis durante el tratamiento <sup>5</sup>.

#### **1.3.1.5. Pretratamiento con ácido**

Este pretratamiento tiene como objetivo hidrolizar la hemicelulosa por medio de la aplicación de ácido a temperatura ambiente. Este procedimiento puede ser ejecutado con ácidos diluidos o fuertes, donde la reacción inicial es la hidrólisis del xilano que es estable<sup>27</sup>.

### **1.4. Raquis de banano**

El banano (*Musa paradisiaca*) es considerado uno de los productos más cultivados en la región occidental y que a la vez genera aproximadamente 25 millones de toneladas métricas de residuos lignocelulósicos a nivel global <sup>30</sup>. En la actualidad, los desechos de la industria agrícola han sido objeto de interés dado que en los próximos años podrían convertirse en una aplicación importante como materia prima de biomasa con un costo muy bajo de obtención <sup>31</sup>.

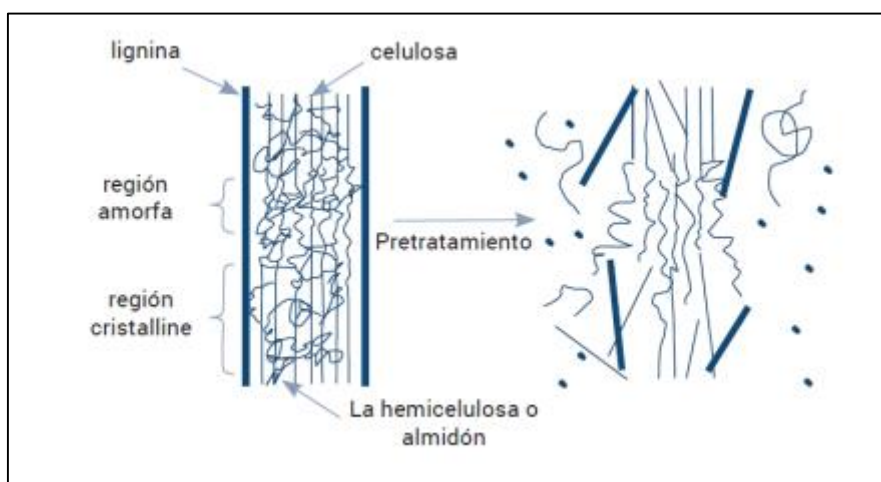
El raquis de banano se ubica entre los residuos agroindustriales que mayor importancia requieren frente a los demás componentes de la planta de banano. El raquis como desecho se genera durante la etapa de cosecha, sin embargo, no es debidamente aprovechado por las industrias ya que una vez extraído los racimos, éste básicamente es depositado en el suelo de la plantación hasta que se lleve a cabo su biodegradación <sup>32</sup>.

#### **1.4.1. Composición química**

La composición química del raquis de banano está determinada principalmente por compuestos solubles y la pared celular que contiene tres polímeros orgánicos: celulosa, hemicelulosa y lignina<sup>31</sup>.



**Gráfico 1.** Estructura del material lignocelulósico.



**Fuente:** <sup>33</sup>

#### ***1.4.1.1. Pared celular***

Es la capa externa de la membrana de la planta y se encarga de darle mayor resistencia estructural, la pared celular de la biomasa lignocelulósica se compone principalmente de polímeros macromoleculares, que incluyen principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina<sup>34</sup>.

#### ***1.4.1.2. Celulosa***

La celulosa se caracteriza por ser uno de los polisacáridos con mayor porcentaje en peso del raquis de banano, estructuralmente es una cadena larga de varias unidades de glucosa con enlaces  $\beta$ -1,4. Como un polímero biodegradable, la celulosa y sus derivados han sido estudio de diversas aplicaciones en la modificación de sus superficies para cambiar las propiedades químicas y físicas y, a la vez mejorar su funcionalidad en los procesos de bioadsorción<sup>35</sup>.

La celulosa se localiza en las paredes de las células vegetales del raquis de banano otorgándole firmeza y estabilidad, internamente se encuentran dispuesta como una red de microfibrillas rodeadas de polímeros como la hemicelulosa y lignina. Existen estudios sobre extracción de microfibrillas a partir tubérculos de papa, frutos de tuna, limón y maíz aplicando métodos químicos de alcalinidad, sin embargo, no se han realizado experimentos propiamente utilizando microfibrillas de celulosa previamente aisladas de la pared celular con porcentajes de hemicelulosa y lignina <sup>36</sup>.

#### ***1.4.1.3. Hemicelulosa***

La hemicelulosa es el segundo polímero más abundante en el raquis de banano, se caracteriza por ser un biorecurso de gran interés luego de la celulosa y constituye el 25% de biomasa de las plantaciones de banano. La hemicelulosa se encuentra rodeando las microfibrillas del raquis, por lo que existen varios métodos de extracción química entre los cuales están: extracción por métodos alcalinos, extracción soluble en ácido y extracción de líquido iónico <sup>31</sup>.

#### ***1.4.1.4. Lignina***

La lignina se describe como uno de los biopolímeros con mayor concentración en las plantas y se encuentra estructuralmente en la pared celular. El raquis de banano además de contener celulosa y hemicelulosa también tiene pequeñas trazas de lignina. Los procesos de extracción de lignina a partir de microfibrillas son muy complejos ya que existe cierta resistencia de la biomasa lignificada debido a la estructura compacta que produce las propiedades de la barrera de lignina. Para la obtención de microfibrillas libre de lignina existen diferentes métodos de pretratamiento que han sido estudiados, considerando el costo y la efectividad los cuales son: craqueo por vapor (SC) y explosión de vapor (SE) <sup>30</sup>.

#### ***1.4.1.5. Pared celular secundaria***

La pared celular primaria determina la forma de la celda y tamaño, pero la mayor parte de la masa de la pared celular se encuentra en la pared celular secundaria. Las paredes celulares secundarias de la madera están compuestas de celulosa, xilano y lignina y tienen varias capas que son diferentes en su composición y proporción entre los componentes y la disposición de las microfibrillas de celulosa <sup>37</sup>.

#### ***1.4.1.6. Aplicación como material adsorbente***

En los últimos años se han realizado varios estudios sobre la aplicación de bioadsorbentes a partir de los residuos de banano, como por ejemplo: la adsorción de metales pesados y colorantes catiónicos con la cascara de banano, pesticidas mediante los tallos del banano, entre otros <sup>38</sup>.

### **1.5. Adsorbentes**

Para que el proceso de adsorción sea eficiente y viable económicamente es importante considerar la elección del material adsorbente, dado que este aspecto es fundamental al momento de estudiar la eliminación o extracción de un elemento en una solución acuosa.

Los adsorbentes pueden ser de carácter natural o sintético, un parámetro esencial al momento de elegir un material adsorbente es la presencia de poros en su superficie, de esta forma el adsorbato tendrá acceso para adherirse y poder realizar el proceso de extracción<sup>39</sup>. Los materiales se pueden clasificar según el diámetro de sus poros como por ejemplo: los poros que presentan un diámetro por debajo de los 2nm se los denominan materiales microporosos, de 2 a 50 nm mesoporosos típicos y por encima de 100 nm materiales macroporosos <sup>40</sup>.

### ***1.5.1. Bioadsorbentes***

Aunque existe una variedad de adsorbentes con características bien definidas en el mercado, la principal desventaja de usarlos es su alto costo, en comparación con los materiales bioadsorbentes de bajo costo y ampliamente disponibles<sup>41</sup>. La bioadsorción consiste en un proceso de adsorción que tiene como finalidad eliminar o recuperar sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en soluciones acuosas mediante la utilización de material biológico que pueden ser microorganismos, algas, vegetales, desechos industriales, desechos agrícolas, estos materiales se los denomina bioadsorbentes <sup>42</sup>. El proceso de bioadsorción se lleva a cabo por interacciones entre el metal y algunos sitios activos como: grupos carboxilo, amino, sulfato, entre otros, presentes en los recubrimientos del biomaterial <sup>43</sup>.

La bioadsorción ha venido siendo estudiada como una alternativa en procesos de recuperación de elemento de tierras raras, en este caso se ha demostrado que es una vía prometedora ya que también es una técnica industrial rentable en comparación al riesgo ambiental producido con tecnologías utilizadas con el mismo propósito <sup>44</sup>.

### **1.6. Titulación Boehm**

Para el proceso de bioadsorción es importante conocer las características químicas superficiales del material adsorbente y al mismo tiempo determinar las ventajas que ofrecen para la recuperación de aniones y cationes. El análisis superficial en muchos casos es fundamental para establecer los grupos funcionales presentes, en la actualidad normalmente se usan análisis espectroscópicos y térmicos los cuales requieren procesos muy complejos, por tal motivo los investigadores también han optado por otro método

volumétrico con valores absolutos que cuantifica los grupos funcionales de la superficie de los materiales, esta técnica se denomina Titulación Boehm<sup>45</sup>.

La Titulación Boehm tiene como objetivo neutralizar los grupos oxigenados de acuerdo a su carácter ácido, para cual se usan distintos reactivos básicos como bicarbonato sódico ( $\text{NaHCO}_3$ ), hidróxido sódico ( $\text{NaOH}$ ) y carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )<sup>46</sup>.

### **1.7. Punto de carga cero (pzc)**

Con el tiempo los residuos lignocelulósicos han sido objeto de estudio debido a las propiedades adsorbentes y su utilización en la recuperación de metales pesados presentes en soluciones acuosas, sin embargo, para el proceso de bioadsorción es importante caracterizar el material y así determinar la capacidad de adsorción. Como por ejemplo, en cierto rango de pH dependiendo de los grupos funcionales algunos materiales bioadsorbentes pueden mostrar mejor desarrollo en presencia de aniones mientras que otros son más correctos para la recuperación de cationes como cromo ( $\text{Cr}^{+3}$ ) y cromo ( $\text{Cr}^{+6}$ ), para poder establecer estos valores de pH existe una técnica denominada punto de carga cero (PZC)<sup>47</sup>.

Se llama punto de carga cero (PZC) al valor del pH en el cual la carga neta superficial de un material adsorbente es cero, esto quiere decir que la cantidad de sitios activos positivos y negativos es la misma, por esta razón el PZC es importante, permite conocer con qué facilidad el material bioadsorbente puede recuperar aniones o cationes<sup>48</sup>.

### **1.8. Estudios de adsorción**

El proceso de adsorción se caracteriza por ser una operación de transferencia de masa, en la cual un elemento de una sustancia en fase líquida o gaseosa se adhiere a la superficie de un material adsorbente. El elemento de interés que se desea separar o extraer se denomina adsorbato. La adsorción es un fenómeno de superficie por lo que es importante considerar la utilización de materiales sólidos que presenten sitios activos o poros con grandes diámetros para que sea posible la deposición del adsorbato <sup>49</sup>.

### ***1.8.1. Fisisorción y quimisorción***

El proceso de retención del elemento químico de interés puede llevarse a cabo mediante dos mecanismos de acuerdo con la interacción entre el adsorbato y el material adsorbente. El primer mecanismo se denomina fisisorción, que consiste en una adsorción física generada por las interacciones entre ambas especies posiblemente causadas por las fuerzas de Van der Waals. La fisisorción se caracteriza por ser un proceso reversible, realizado a bajas temperaturas con la formación de varias capas de molécula sobre la superficie del sólido con cantidades mínimas de entalpia en la etapa de adsorción<sup>50</sup>.

Por otro lado, la quimisorción consiste en una adsorción química producida por un intercambio de electrones entre las sustancias, se caracteriza por formar enlaces más compactos y fuertes a diferencia de la fisisorción. Los enlaces durante la adsorción física producen una sola capa de molécula en la superficie del material adsorbente. La adsorción química es un proceso irreversible dado que las sustancias químicas utilizadas en las etapas cambian las propiedades del adsorbato y se la realiza a temperaturas elevadas<sup>50</sup>.

### ***1.8.2. Parámetros de adsorción.***

Durante el proceso de adsorción, además del tamaño de poros, existen otros parámetros que pueden influir en el desarrollo de la eliminación del elemento en la solución acuosa como por ejemplo: las interacciones electrostáticas entre los metales pesados y la superficie del adsorbente, el intercambio iónico de los metales con la superficie del adsorbente, formación de complejos metálicos con grupos funcionales en el adsorbente, precipitación de metales para producir compuestos no solubles y extracción de las especies metales y posterior desorción. Los mecanismos anteriormente mencionados varían de acuerdo a las características físicas y químicas del material adsorbente y del adsorbato<sup>51</sup>.

Existe una variedad de adsorbentes utilizados a nivel comercial entre los cuales están el carbón activado, el gel de sílice, la alúmina activada, las zeolitas y resinas poliméricas sintéticas. Para la utilización de este tipo de adsorbentes es necesario que cumplan algunos requisitos como por ejemplo: alta selectividad para los iones de metales pesados, capacidad de adsorción a un pH bajo, fácil desorción de iones metálicos, altas tasas de adsorción y desorción, alta capacidad de adsorción, selectividad, regenerabilidad, bajo costo, compatibilidad y alta resistencia mecánica<sup>52</sup>, sin embargo es complicado que un

adsorbente cuenta con todas estas características por lo que es importante analizar todo el proceso y buscar el material mejor viable.

### ***1.8.3. Isotermas de adsorción***

La relación que existe entre un gas adsorbido por medio de un sólido con cierta temperatura constante a través de la presión generada por un gas es denominada como isoterma de adsorción. Existen diferentes tipos de adsorción definidas como fisisorción y quimisorción <sup>53</sup>.

#### ***1.8.3.1. Isoterma de Langmuir***

La isoterma de Langmuir consiste en la relación de la adsorción de ciertas moléculas en superficies solidas por medio de presión de gas que el mismo se encuentra a temperatura constante.

$$q_e = \frac{Q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

Donde:

$q_e$  = Cantidad de adsorbato en el adsorbente en equilibrio (mg/g)

$Q_{max}$  = Capacidad máxima de cobertura de monocapa (mg/g)

$C_e$  = Concentración del adsorbato en equilibrio (mg/L)

$b$  = Constante de isoterma de Langmuir (dm<sup>3</sup>/mg).

#### ***1.8.3.2. Isoterma de Freundlich***

El isoterma de Freundlich consiste en relación del soluto que se encuentra sobre la superficie del adsorbente y la concentración del mismo soluto que se encuentra en contacto con un líquido <sup>54</sup>.

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

Donde:

$q_e$  = Cantidad de adsorbato contenido en el adsorbente (mg/g)

$K_F$  = Capacidad de adsorción (mg/g)

$C_e$  = Concentración de equilibrio (mg/g)

$n$  = Intensidad de adsorción.

#### ***1.8.4. Cinética de adsorción***

La cinética de adsorción describe el comportamiento en relación de la velocidad de adsorción de parte del adsorbato, lo mismo que determina el tiempo de residencia<sup>55</sup>. Además la cinética de adsorción identifica la velocidad de remoción del contaminante solido-dilución por ende indica el avance de cada etapa de adsorción en el proceso ya sea por reacción química, difusión o transferencia de masa<sup>56</sup>.

La ecuación de pseudo-primer orden se basa en la ecuación de adsorción.

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

**Donde:**

$k_1$  = constante de pseudo-primer orden  $\left(\frac{g}{mg} * min\right)$

$q_e$  y  $q_t$  = capacidad de adsorción en equilibrio en un tiempo determinado  $\left(\frac{mol}{kg}\right)$ <sup>57</sup>.

La ecuación de pseudo-segundo orden o cinética en quimisorción.

$$q_t = \frac{q_e^2 kt}{(1 + kq_e t)} \quad (4)$$

**Donde:**

$k_2$  = constante de pseudo-segundo orden  $\left(\frac{g}{mg} * min\right)$

$q_e$  y  $q_t$  = capacidad de adsorción en equilibrio en un tiempo determinado  $\left(\frac{mg}{g}\right)$ <sup>58</sup>.

## **2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA**

### **2.1. Tipo de investigación**

El presente trabajo de investigación se basa en un estudio experimental, analítico y comparativo.

### **2.2. Recolección de la muestra**

Las muestras de raquis de banano fueron recolectadas en la facultad de Ciencias Agropecuarias de la ciudad de Machala provincia de El Oro.

### **2.3. Ubicación de la Investigación**

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigaciones: Área de Biomateriales de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala, donde se realizó la preparación de la muestra, procedimientos de aislamiento de materiales, caracterización, estudios de pH y estudios de adsorción.

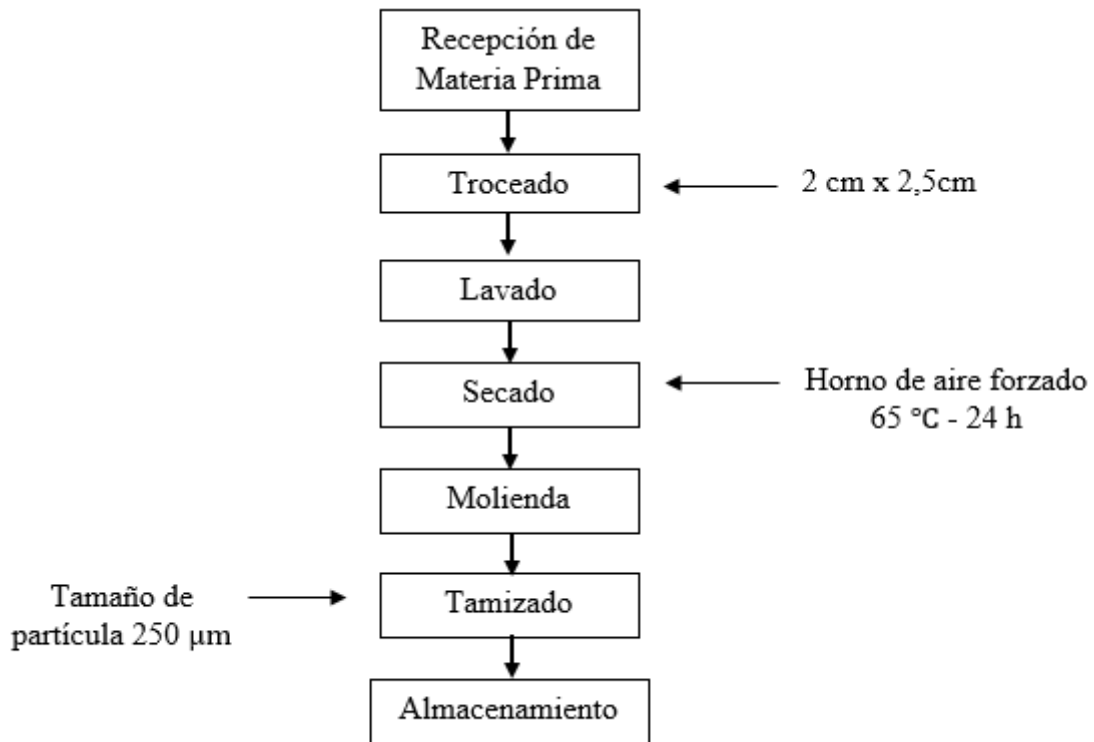
### **2.4. Desarrollo Experimental.**

#### ***2.4.1. Preparación de la muestra***

El raquis de banano como residuo lignocelulósico fue recolectado de las plantaciones ubicadas en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala, Ecuador. En primer lugar, se cortaron 3 kg de tallo, luego se procedió a lavar con agua desionizada para eliminar las partículas adheridas a la superficie del material, después se cortaron pequeños trozos de 2 cm x 2,5cm, posteriormente se procedió a secar en una estufa de aire forzado a 65 °C durante 24 horas. Luego se trató mecánicamente con un molino de cuchillas y se lo pasó a través de un tamiz 250 µm, finalmente se almacenó en fundas zipper para aislar el material de la humedad y otros factores<sup>36</sup>.



**Diagrama 1.** Flujo del proceso de preparación de la muestra



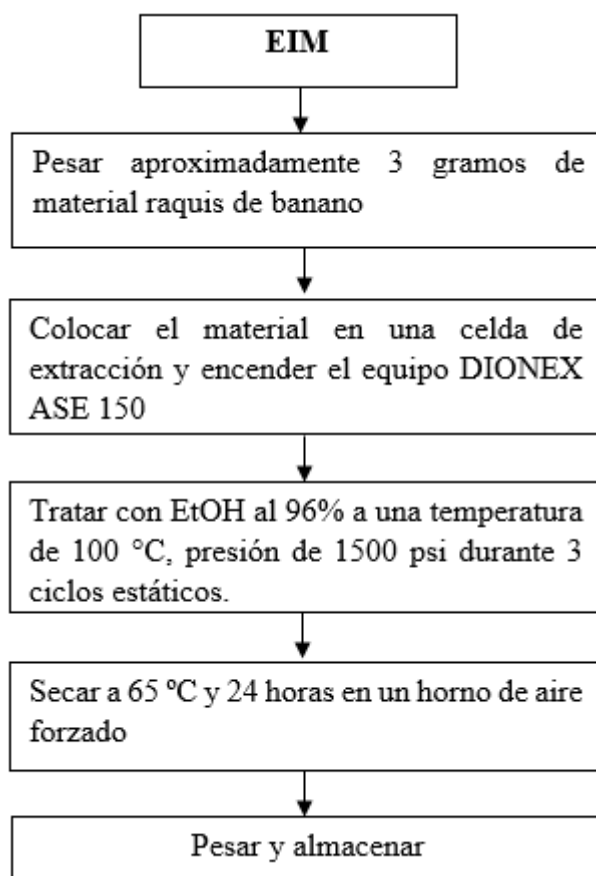
**Fuente:** Autores

#### **2.4.2. Proceso de aislamiento de materiales**

##### **2.4.2.1. Material insoluble en etanol (EIM)**

Para obtener el material libre de alcohol se basó en el método NREL / TP-510-42619 en un extractor acelerado DIONEX ASE 150. Se agregaron alrededor de tres gramos de material raquis de banano en una celda y se procedió a tratar con etanol al 96% a una temperatura de 100 °C, presión de 1500 psi durante 3 ciclos estáticos por aproximadamente 40 minutos. Después de la extracción, el sólido se secó a 65 °C y 24 horas en una estufa de aire forzado, finalmente se pesó y se almacenó en fundas herméticas<sup>59</sup>.

**Diagrama 2.** Flujo del proceso para asilamiento del EIM



**Fuente:** Autores

Para establecer el porcentaje de material extraíble mediante etanol se procedió a aplicar la ecuación 5:

$$\%EIM = \frac{P_o - P_f}{P_o} \times 100 \quad (5)$$

**Donde:**

**EIM** = Material insoluble de etanol

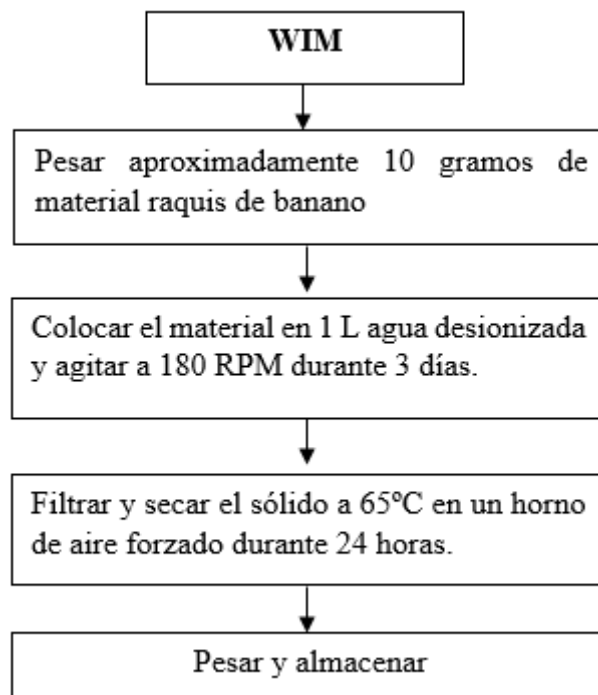
**Po**= Peso inicial de la muestra antes de tratarla con etanol

**Pf**= Peso final de la muestra luego del tratamiento

#### 2.4.2.2. *Material insoluble en agua (WIM)*

Para la obtención de material libre de agua se agregaron alrededor de 10 gramos de materia prima a 1 L de agua desionizada y se agitó a 180 RPM durante 3 días, posteriormente se dejó decantar el material y luego se separó el sólido por filtración para después secar en una estufa de aire forzado a 65°C durante 24 horas y finalmente se almacenó en un recipiente hermético<sup>59</sup>.

**Diagrama 3.** Flujo del proceso para asilamiento del WIM



**Fuente:** Autores

Para establecer el porcentaje de material extraíble mediante agua se procedió a aplicar la ecuación 6:

$$\%WIM = \frac{P_o - P_f}{P_o} \times 100 \quad (6)$$

**Donde:**

**WIM:** Material insoluble en agua

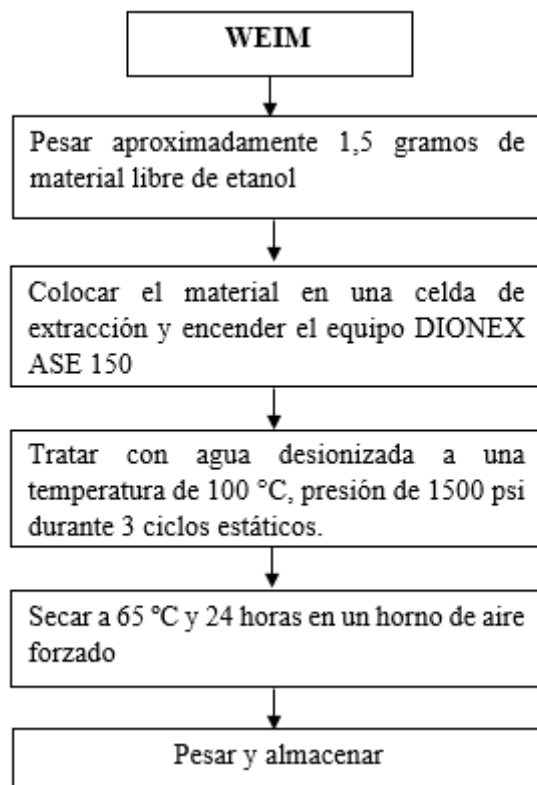
**P<sub>o</sub>**= Peso inicial de la muestra antes de tratarla con agua

**P<sub>f</sub>**= Peso final de la muestra luego del tratamiento

### 2.4.2.3. Material insoluble en Etanol-Agua (WEIM)

Se agregaron alrededor de 1,5 gramos de material libre de etanol en una celda y se procedió a tratar con agua desionizada a una temperatura de 100 °C, presión de 1500 psi durante 3 ciclos estáticos de aproximadamente 40 minutos. Después de la extracción, el sólido se secó a 65 °C y 24 horas en una estufa de aire forzado, finalmente se pesó y almacenó en fundas herméticas<sup>59</sup>.

**Diagrama 4.** Flujo del proceso para asilamiento del WEIM



**Fuente:** Autores

Para establecer el porcentaje de material extraíble mediante etanol – agua se procedió a aplicar la ecuación 7:

$$\%WEIM = \frac{P_o - P_f}{P_o} \times 100 \quad (7)$$

**Donde:**

**WEIM:** Material insoluble de agua- etanol

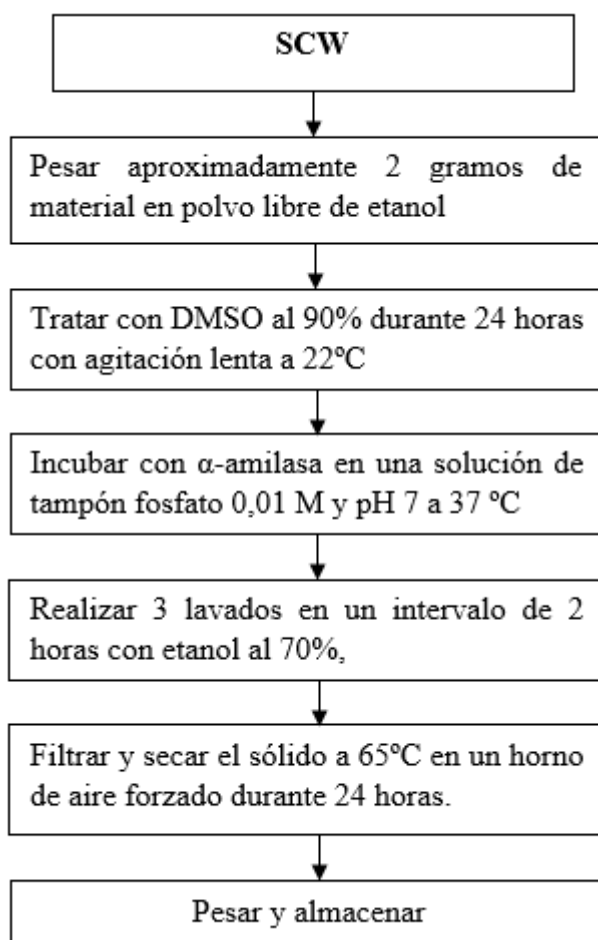
**Po=** Peso inicial de la muestra

**Pf**= Peso final de la muestra

#### 2.4.2.4. Pared celular secundaria (SCW)

Para la obtención de la pared celular secundaria se procedió a pesar aproximadamente 2 gramos de material en polvo libre de etanol, posteriormente se lo trató con Dimetil sulfoxido DMSO al 90% durante 24 horas con agitación lenta a 22°C, luego se incubó con  $\alpha$ -amilasa en una solución de tampón fosfato 0,01 M y pH =7 a 37 °C. Al finalizar el proceso de incubación, se realizaron 3 lavados en un intervalo de 2 horas con etanol al 70%, después se separó el sólido por filtración para posteriormente secar en una estufa de aire forzado a 65°C y se almacenó para las próximas pruebas<sup>60</sup>.

**Diagrama 5.** Flujo del proceso para aislamiento de la SCW



**Fuente:** Autores

Para determinar el porcentaje de pared celular aislada del material libre de etanol se utilizará la siguiente ecuación:

$$\%SCW = \frac{P_f \times 100}{P_o} \quad (8)$$

**Donde:**

**SCW:** Pared celular secundaria

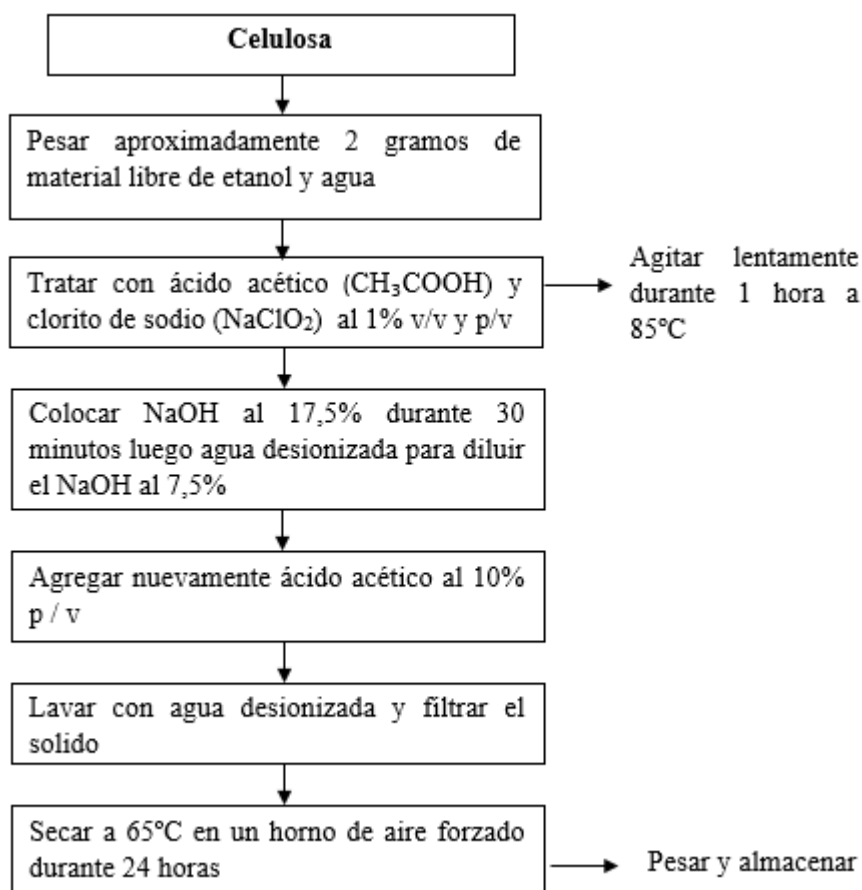
**Po=** Peso inicial de la muestra (gramos

**Pf=** Peso final de la muestra

#### 2.4.2.5. Celulosa

Para la obtención de la celulosa se pesaron aproximadamente 2 gramos de material libre de etanol y agua, luego se trató con ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) (1% v/v) y clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) (1% p/v) y, se dejó en agitación lenta durante 1 hora a 85°C, se añadió más reactivo hasta que el material se tornó beige blanquecino, posteriormente se colocó NaOH al 17,5% durante 30 minutos, luego agua desionizada para diluir el NaOH al 7,5%. Nuevamente, se agregó ácido acético (10% p/v), se hizo otro lavado con agua, se filtró y se secó a 65°C en una estufa de aire forzado y se almacenó en funda hermética<sup>41</sup>.

**Diagrama 6.** Flujo del proceso para asilamiento de la celulosa



**Fuente:** Autores

Para determinar el porcentaje de celulosa aislado del material libre de etanol se utilizará la siguiente ecuación:

$$\%Celulosa = \frac{P_f \times 100}{P_o} \quad (9)$$

**Donde:**

**Po**= Peso inicial de la muestra (gramos)

**Pf**= Peso final de la muestra

### **2.4.3. Caracterización del material**

#### **2.4.3.1. Extraíbles**

Para realizar el proceso de caracterización de compuestos solubles en etanol y agua se utilizó el equipo de extracción acelerada Dionex ASE 150 de acuerdo al método NREL / TP-510-42619. Se pesó alrededor de 2 gr de cada material aislado, por otro lado, las celdas y filtros que fueron utilizados se los procedió a colocar en la estufa para eliminar la humedad presente a 65°C. Se configura el equipo con la metodología 20 que es la utilizada para la extracción en materiales lignocelulósicos, se coloca el disolvente que servirá para realizar el lavado, en este caso agua o etanol, se ajusta la presión del nitrógeno y se realiza el proceso durante aproximadamente 30 minutos. Finalmente, las celdas se las ubican en un desecador durante 15 minutos y luego se pesa el filtro junto con la muestra en una balanza analítica.

Con la siguiente ecuación se puede determinar el porcentaje de extraíbles de la muestra tratada.

$$\%Extraibles = \frac{P_o - P_f}{P_o} \times 100 \quad (10)$$

**Donde:**

**Po**: Peso inicial

**Pf:** Peso final

#### **2.4.3.2. Holocelulosa**

Para la determinación de porcentaje de holocelulosa mediante el método establecido ASTM D 1104, se procede a pesar aproximadamente 2g de extraíble para ser trasladado a un matraz de 250ml, donde se agregó agua desionizada con 200µL ácido acético e hipoclorito de sodio 1g del mismo. Dentro del procedimiento se debe llevar a cabo en un baño maría en un rango de temperatura de 75-80°C, es importante perforar el papel de Parafilm que recubre el matraz de tal manera permite la expulsión de gases de este.

Después de un tiempo de 1h se agregan las mismas cantidades de hipoclorito de sodio y ácido acético para conseguir un mejor blanqueamiento. La muestra es llevada a un choque térmico con agua de 10°C, posteriormente es filtrada para ser llevada a 105°C dentro de una estufa. Finalmente es enfriada dentro de un desecador y pesado para el cálculo de porcentaje en holocelulosa. A continuación, se muestra en la ecuación 11 para determinar el % de holocelulosa.

$$\%Holocelulosa = \frac{P_f \times 100}{P_o} \quad (11)$$

**Donde:**

**Po:** Peso inicial

**Pf:** Peso final

#### **2.4.3.3. Celulosa**

Para la preparación de la celulosa se pesaron aproximadamente 2 gramos de material libre de etanol y agua, luego se trató con ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) (1% v/v) y clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) (1% p/v) y, se dejó en agitación lenta durante 1 hora a 85°C, se añadió más reactivo hasta que el material se tornara beige blanquecino, posteriormente se colocó NaOH al 17,5% durante 30 minutos luego agua desionizada para diluir el NaOH al 7,5%. Nuevamente, se agregó ácido acético (10% p / v), luego se lavó con agua, se filtró y se secó a 65°C en una estufa de aire forzado y se almacenó en funda hermética. Para determinar el % de celulosa se utilizó la ecuación 12:

$$\%Celulosa = \frac{P_f \times 100}{P_o} \quad (12)$$



**Donde:**

**Po:** Peso inicial

**Pf:** Peso final

#### **2.4.3.4. Hemicelulosa**

La determinación de hemicelulosa es ejecutada por medio del despeje de la ecuación 13, ya que técnica explícita no hay. La diferencia de rendimiento de celulosa y holocelulosa permiten caracterizar la cantidad de hemicelulosa contenida dentro de los materiales lignocelulósicos.

$$\%Holocelulosa = \%Celulosa + \%Hemicelulosa$$

$$\%Hemicelulosa = \%Celulosa - \%Holocelulosa \quad (13)$$

#### **2.4.3.5. Titulación Boehm**

Para la determinación de sitios ácidos, básicos y grupos funcionales de los materiales lignocelulósicos se siguió la siguiente metodología. Se pesaron 25 mg de cada material para ser agitado con hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), bicarbonato de sodio (HNaCO<sub>3</sub>) y ácido clorhídrico (HCl) a una concentración 0.1 M. Tomando alícuotas 20-30 ml de cada reactivo para las diferentes muestras colocadas en tubos falcon de 50 ml, se agito durante 24h, posteriormente se filtró para ser aireado con nitrógeno durante 15 minutos<sup>61</sup>.

La titulación Boehm es realizada por técnica volumétrica con NaOH, la muestra luego de ser aireada se aplica 2 gotas de fenolftaleína, esta técnica permite determinar el volumen donde la solución llegue a punto neutro dando el viraje que es la cantidad usada para cálculos de ácidos, básicos y grupos funcionales<sup>62</sup>.

#### **2.4.3.6. Potencial de carga cero**

Este proceso se llevó a cabo por duplicado, en el cual se tomaron 0,0250 g de cada material aislado y se lo colocó en un tubo falcon de 50 ml, en ese recipiente se colocaron 25 ml de cloruro de sodio (NaCl) 0.01 M para pH de 2 a 12, se dejó en agitación durante 24 horas a 120 rpm, posteriormente se lee el pH final y se tabulan los datos.

#### **2.4.4. Estudio de pH**

Para llevar a cabo el estudio de pH, inicialmente se preparó una solución madre de 1000 ppm de concentración cromo (Cr) a partir de 1,414 gr de dicromato de potasio ( K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>),

luego se tomó una alícuota para obtener una concentración de 50 ppm, esta solución se la llevó a diferentes valores de pH de 2, 3 y 5. La dosificación que se usó para éste estudio fue de 1 g/L y se trabajó con muestras por duplicado, por lo que se pesó 0,0250 gr de material insoluble en etanol (EIM), material insoluble en agua (WIM), material insoluble en etanol-agua (WEIM), pared celular secundaria (SCW) y celulosa junto con 25 ml de solución de cromo a 50 ppm. El proceso se realizó durante 24 horas con una agitación constante de 120 rpm, finalmente se establece el pH final de las muestras, se procede a filtrar y la correspondiente lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica.

#### ***2.4.5. Isotermas de absorción***

Este estudio se aplicó a los 5 materiales aislados del raquis de banano (EIM, WIM, WEIM, SCW, CELULOSA)

- Se llevó a cabo la elaboración de la solución madre de 1000 ppm a partir de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), luego se ajustó al pH óptimo obtenido en el estudio anterior, en este caso para los materiales EIM, SCW, CELULOSA a pH 2 y para WEIM y WIM a un pH 3.
- Las concentraciones con las que se trabajaron a partir de la solución madre de cromo fueron 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500 y 600 ppm para todos los materiales lignocelulósicos.
- Las condiciones de trabajo fueron 1 g/L de dosificación, muestras por duplicado, agitación constante a 150 rpm durante 24 horas.
- Finalmente se realizó la lectura del pH final, filtración de cada muestra y lectura en el equipo de absorción atómica para determinar la concentración final.

#### ***2.4.6. Cinética de absorción***

Para llevar a cabo este análisis se preparó una solución de cromo de 500 ml a una concentración de 100 ppm ajustada a un pH óptimo de 3. Se colocó alrededor de 0.5 g del material de WIM debido a que éste presentó un mejor comportamiento respecto a los demás adsorbentes en la recuperación del adsorbato. El material junto con la solución se mantuvo a una agitación constante de 150 rpm durante 4 horas, durante ese lapso de tiempo se tomó una alícuota de 10 ml al primer contacto como valor referencial al tiempo

0, posteriormente en un rango de 2 horas se tomaron las siguientes alícuotas en un intervalo de 10 minutos y, después de 2 horas se procedió a tomar muestras cada 20 minutos. Finalmente, las muestras fueron filtradas y leídas en el equipo de absorción atómica.

## **2.5. Materiales, reactivos y equipos**

### **2.5.1. Materiales**

- Pipetas volumétricas 10 ml, 25 ml
- Micropipeta
- Vasos de precipitación 50 ml, 100 ml, 250 ml, 500 ml, 1000 ml
- Frascos ámbar 1000 ml
- Tubos de ensayo
- Luna reloj
- Embudos
- Pinzas
- Crisoles
- Tamiz
- Mortero
- Varilla de agitación
- Balón volumétrico 25 ml, 100 ml, 250 ml, 500 ml
- Matraces aforados
- Mandil
- Mascarilla
- Matraz Erlenmeyer
- Filtros cuantitativos
- Espátulas

### **2.5.2. Reactivos.**

- Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 96%)
- Dimetil sulfoxido (DMSO 99%)

- alfa-amilasa
- Estándar de Cromo (Cr) 1000 ppm
- Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  70%)
- Clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ )
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ )
- Ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$  99.9%)
- Fosfato de sodio monobásico ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ )
- Fosfato de sodio dibásico ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  96%)
- Dicromato de Potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )

### **2.5.3. Equipos**

- Balanza Analítica
- Estufa de aire forzado
- Molino
- pH-metro Metler Toledo
- Espectrofotómetro de Adsorción Atómica Shimadzu AA-6300
- Agitador magnético
- Extractor acelerado DIONEX ASE 150
- Bombas al vacío
- Campana de Extracción de Gases
- Compresor
- Tanque de acetileno
- Tanque de nitrógeno

### 3. CAPITULO III: RESULTADOS

#### 3.1. Aislamiento de materiales lignocelulósicos

El raquis de banano estructuralmente está compuesto por compuestos solubles y la pared celular conformada de biopolímeros como la celulosa, hemicelulosa y lignina, también los compuestos solubles como glucosa y xilosa pueden ser extraídos con etanol y agua, por tal motivo a continuación se muestran los resultados del proceso:

##### 3.1.1. Material insoluble en etanol (EIM)

El propósito de tratar el raquis de banano con etanol es eliminar todos esos compuestos que pueden interferir con la adsorción del cromo, principalmente monosacáridos solubles como la glucosa y xilosa, también este material servirá para la obtención de otro material bioadsorbente. En la tabla 2 se puede observar el porcentaje extraíbles obtenido a partir de cierta cantidad de raquis de banano:

**Tabla 2.** Porcentaje de extraíbles en etanol

Material	P <sub>o</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	% Extraíbles
<b>Raquis de banano</b>	3.0853	2.6250	14.91

**Fuente:** Elaboración propia

Como resultado se puede visualizar que el raquis de banano contiene un 14,91% de compuestos solubles en etanol al 96%.

##### 3.1.2. Material insoluble en agua (WIM)

En la tabla 3 es posible visualizar el porcentaje de extraíbles con agua utilizando el equipo extractor Thermo Scientific Dionex ASE 150 para eliminar compuestos azucarados y material inorgánico:

**Tabla 3.** Porcentaje de extraíbles en agua

Material	P <sub>o</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	% Extraíbles
<b>Raquis de banano</b>	15.5419	13.3598	14.04

**Fuente:** Elaboración propia

Como resultado se puede visualizar que el raquis de banano contiene un 14.04% de compuestos solubles en agua.

### 3.1.3. Material insoluble en etanol-agua (WEIM)

Para este estudio se pesó cierta cantidad de material insoluble en etanol (EIM) y se trató con agua en el equipo Dionex ASE 150, el porcentaje de extraíbles se muestra en la tabla 4:

**Tabla 4.** Porcentaje de extraíbles en etanol-agua

Material	P <sub>o</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	% Extraíbles
<b>Material Insoluble en Etanol (EIM)</b>	11.85	8.89	24.97

**Fuente:** Elaboración propia

Como resultado se puede visualizar que el raquis de banano contiene un 24.97% de compuestos solubles en etanol y agua.

Los resultados obtenidos para el porcentaje de extraíbles son mayores en comparación a los establecidos por <sup>31</sup> donde los extraíbles de agua y etanol están en 9.7 % w/w, esto podría deberse a la utilización del equipo acelerador Dionex ASE 150 donde se pueden controlar mejor las condiciones de trabajo.

### 3.1.4. Pared celular secundaria (SCW)

En la obtención de pared celular se utilizó material libre de etanol (EIM), en la tabla 5 se puede visualizar el porcentaje de pared celular presente en el material:

**Tabla 5.** Porcentaje de pared celular en EIM

Material	P <sub>o</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	% Pared Celular
<b>Material Insoluble en Etanol (EIM)</b>	2.0989	0.5716	27.23

**Fuente:** Elaboración propia

Como resultado se puede visualizar que el raquis de banano contiene un 27.23% de pared celular.

### 3.1.5. Celulosa

En la obtención de celulosa se utilizó material libre de etanol y agua (WEIM), en la tabla 6 se puede observar el porcentaje de celulosa presente en el material:

**Tabla 6.** Porcentaje de celulosa en WEIM

Material	P <sub>o</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	% Celulosa
<b>Material Insoluble</b>			
<b>en Etanol-Agua (WEIM)</b>	3.0432	1.2265	40.30

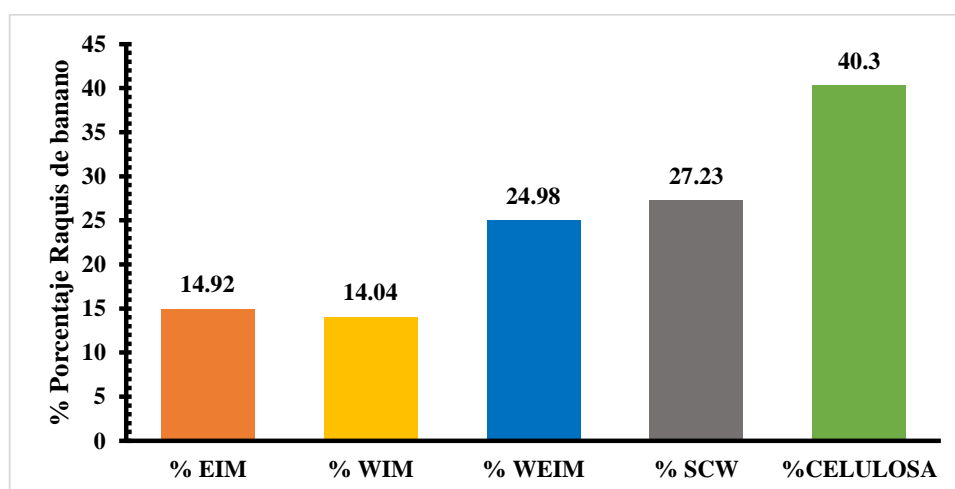
**Fuente:** Elaboración propia

En conformidad con la tabla 6 se observa que el raquis de banano contiene un 40.30% de celulosa, el cual es una cantidad mayor a la obtenida para el <sup>39</sup> tratamiento y proceso de blanqueado únicamente utilizan hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5% mientras que en este trabajo de titulación se usó clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) al 1%, hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5% y ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) al 10%.

### 3.1.6. Composición del Raquis de Banano

Luego de haber realizado el proceso de aislamiento de los materiales a través de las diversas técnicas y métodos empleados, en el gráfico 1 se muestran la composición del raquis de banano puros y el porcentaje de los materiales:

**Gráfico 2.** Composición del raquis de banano puro



**Fuente:** Elaboración propia

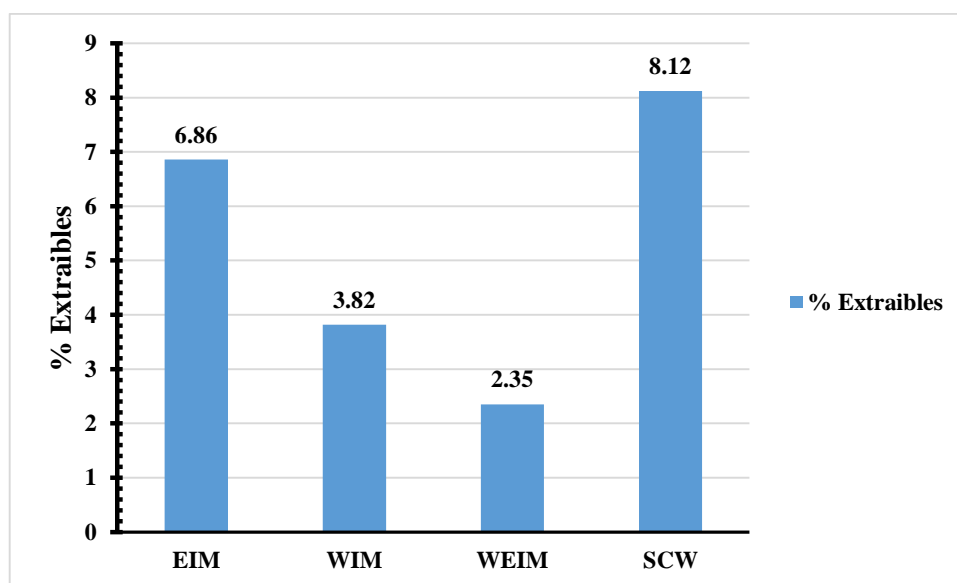
Los cinco materiales que se observan en el gráfico 2 fueron caracterizados a través de normas ASTM (American Society of Testin Materials) para determinar extraíbles, holocelulosa, celulosa y hemicelulosa, luego mediante potencial de carga cero (pzc) para establecer el punto pH neutro de cada bioadsorbente y finalmente titulación boehm para identificar las propiedades químicas superficiales y grupos funcionales.

### 3.2. Caracterización del material lignocelulósico

#### 3.2.1. Determinación de Extraíbles

Este proceso tiene la finalidad de eliminar compuestos solubles como azúcares no estructurales entre otros, que pueden interferir en el análisis de la composición de los materiales aislados, a continuación, en el gráfico 3 se muestra el porcentaje de extraíbles resultante:

**Gráfico 3.** Porcentaje de extraíbles en los bioadsorbentes



**Fuente:** Elaboración Propia

Es importante tomar en cuenta que el porcentaje de extraíbles de cada material varía de acuerdo al tratamiento que se utilizó para el aislamiento, por ejemplo, para el aislado del material WIM el raquis puro fue tratado únicamente con agua desionizada resultando un 3.82% eliminando compuestos solubles como azúcares y compuestos inorgánicos, mientras el material EIM se trató con etanol al 96% resultando un 6.86 % de extraíbles, porcentaje mayor al obtenido en el WIM, dando a conocer que el raquis contenía más compuestos solubles en etanol. Por otro lado, existe una clara diferencia en el porcentaje



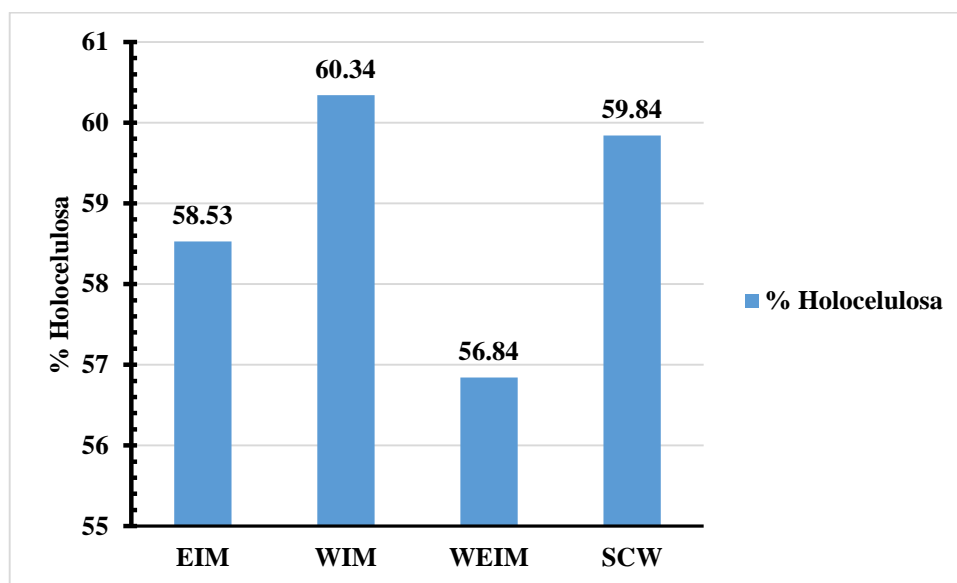
del material WEIM que fue de 2.35 %, este valor refleja el tratamiento al que fue sometido, inicialmente tomando material libre de etanol (EIM) y luego procesado con agua desionizada. Finalmente, la pared celular secundaria (SCW) con un porcentaje de 8,12% de extraíbles asume que fue obtenida a partir del material EIM.

### 3.2.2. Determinación de Holocelulosa

La holocelulosa se caracteriza por ser el componente principal de los materiales lignocelulósicos dado que está compuesta por el total de carbohidratos entre la celulosa y hemicelulosa<sup>63</sup>.

Para identificar el porcentaje de holocelulosa se llevó a cabo la aplicación de la norma ASTM D-1104 para los materiales bioadsorbentes representados en el gráfico 4:

**Gráfico 4.** Porcentaje de holocelulosa en los bioadsorbentes



**Fuente:** Elaboración propia

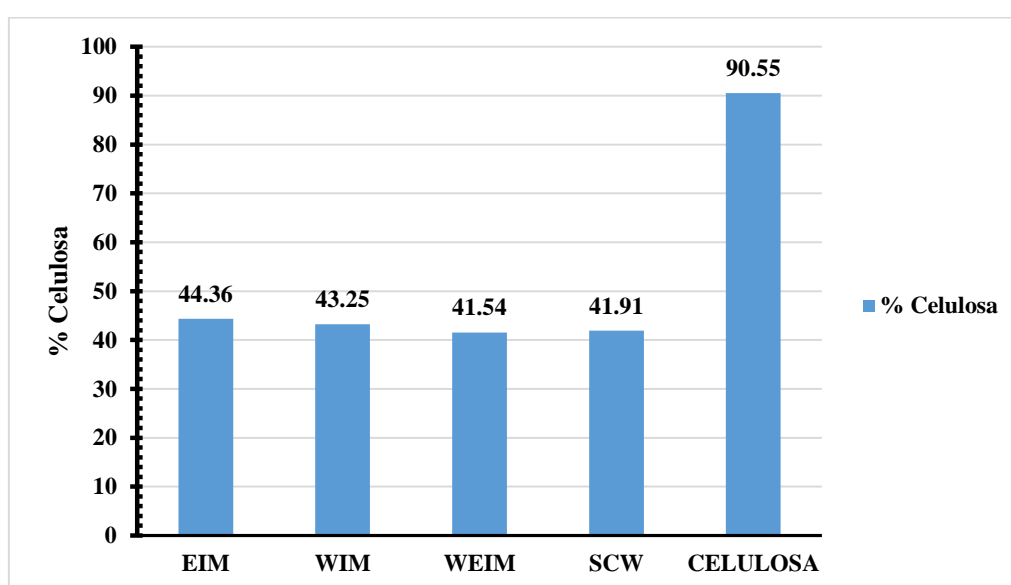
En otras investigaciones para la determinación de holocelulosa en raquis de banano obtienen un porcentaje mayor 75,23%<sup>64</sup>, por otro lado <sup>65</sup> trabajan en la composición de las distintas partes del plátano con un 46.7% de holocelulosa en el raquis, valor muy por debajo a los obtenidos en los distintos materiales bioadsorbentes de este trabajo, sin embargo, existen valores similares de holocelulosa en otros materiales como por ejemplo en la paja de caña y meollo de bagazo con un 60 %<sup>66</sup>. El contenido de holocelulosa está

determinado en su mayoría por el tratamiento para aislar los diferentes compuestos, el lugar de origen del residuo agroindustrial y otros factores.

### 3.2.3. Determinación de Celulosa

Para obtener los porcentajes de celulosa se utilizó la metodología de <sup>41</sup> donde utilizan clorito de sodio, hidróxido de sodio y ácido acético como agentes para el blanqueamiento, en el gráfico 5 se muestran los resultados.

**Gráfico 5.** Porcentaje de celulosa en los bioadsorbentes



**Fuente:** Elaboración propia

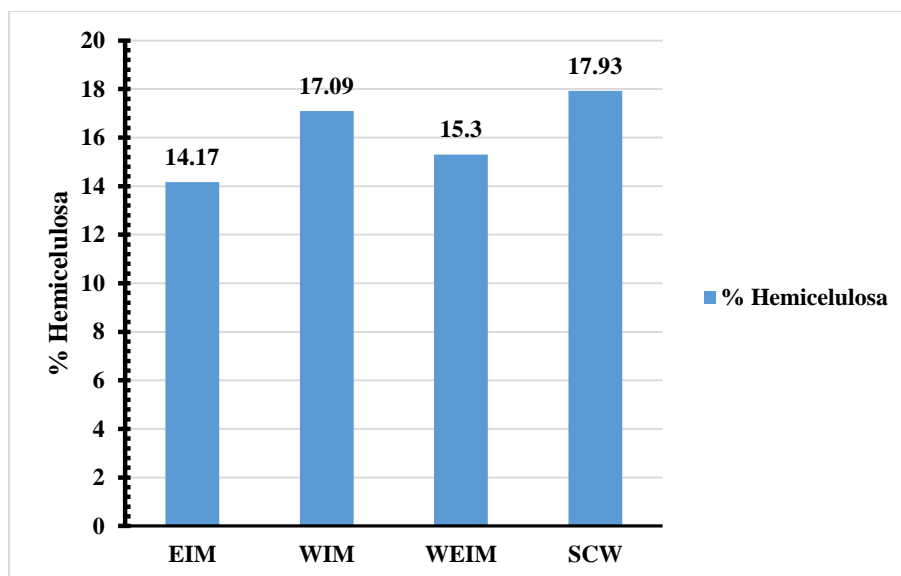
El porcentaje de celulosa de los cuatro primeros materiales bioadsorbentes es superior al reportado por<sup>67</sup> donde ejemplifica la composición química de algunos materiales lignocelulósicos como por ejemplo: bagazo de la caña de azúcar 36%, paja de maíz 36%, paja de trigo 39%, cascara de arroz 38%. Por otro lado<sup>65</sup> reporta valores para raquis de banano 38%, 37.3% y 44.3%, este último valor aproximado al material EIM. De igual forma <sup>64</sup> obtiene un porcentaje de 41.52% de celulosa, valor similar al material WEIM.

Existe un trabajo realizado por <sup>39</sup> donde aíslan celulosa a partir de raquis de banano y obtienen un porcentaje del 53%, sin embargo es un valor muy inferior respecto al que se reporta en esta investigación del 90.55%, esta diferencia puede deberse al método aplicado para la caracterización y la interferencia de algunos compuestos solubles en agua y etanol.

### 3.2.4. Determinación de Hemicelulosa

Para la obtención de los porcentajes de hemicelulosa presente en los materiales aislados se procedió a realizarlos mediante la diferencia entre los valores de holocelulosa y hemicelulosa, los resultados se los presenta en el gráfico 6:

**Gráfico 6.** Porcentaje de hemicelulosa en los bioadsorbentes



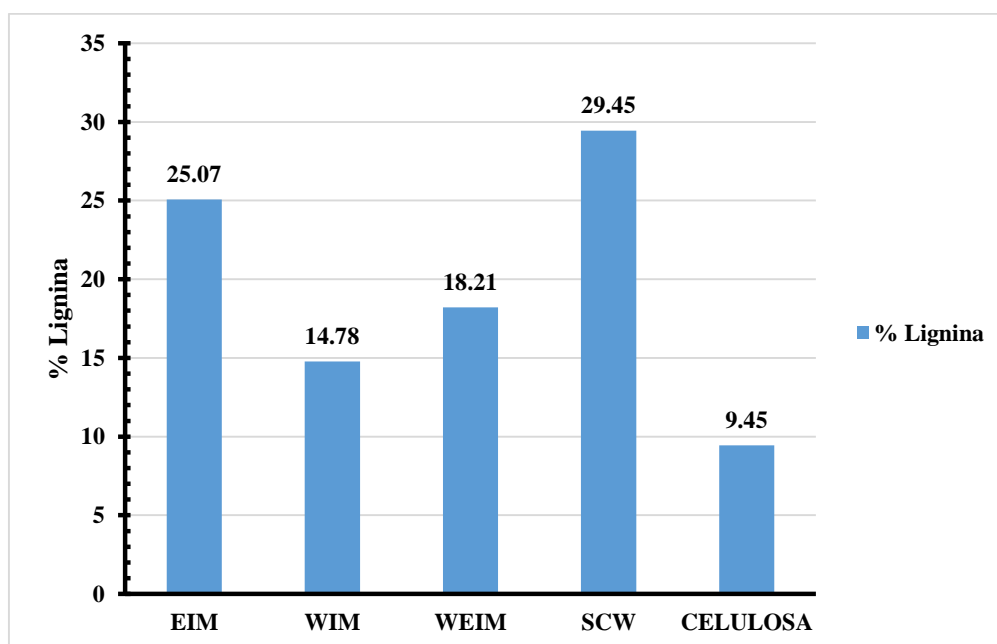
**Fuente:** Elaboración propia

Respecto a los valores de hemicelulosa obtenidos de los materiales aislados existen porcentajes superiores reportados por<sup>67</sup> para bagazo de la caña de azúcar 28%, paja de maíz 28%, paja de trigo 36%, cascara de arroz 20%. Por otro lado <sup>68</sup>, caracteriza la pared celular con un 19.92% de hemicelulosa mientras que el material SCW de esta investigación tiene un valor inferior de 17.93%, de igual manera<sup>69</sup> reporta un porcentaje de 14.47% de hemicelulosa en el raquis de banano, cantidad similar al material EIM. Otra investigación<sup>65</sup> consiguen un valor muy por debajo de todos los obtenidos en este trabajo de 8.7% de hemicelulosa en el raquis de banano.

### 3.2.5. Determinación de Lignina

Para determinar lignina se utilizó la norma TAPPI T-222, nos permitió establecer el porcentaje de lignina en los 5 materiales<sup>70</sup>.

**Gráfico 7.** Porcentaje de lignina en los bioadsorbentes



**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados obtenidos en el gráfico 7 del porcentaje de lignina coinciden con lo que reporta <sup>37 34</sup>, donde indican que la masa de hemicelulosa y celulosa en la pared celular secundaria es mayor que en la pared celular primaria dado que la hemicelulosa tiene menos cadenas laterales en la pared secundaria, por otro lado en <sup>68</sup> obtienen un valor superior de lignina alrededor del 38.82% en la pared celular y, 26% en una muestra de raquis de banano puro. Otra investigación <sup>39</sup> reporta un porcentaje de 12% en el raquis puro y 9% en la celulosa, valor similar al resultado de esta investigación.

### **3.2.6. Titulación Boehm**

A través de la titulación Boehm se procedió a identificar la concentración de sitios ácidos, básicos y los grupos funcionales lactónicos, fenólicos y carboxílicos como se muestra en la tabla 7:

**Tabla 7.** Titulación Boehm de los bioadsorbentes

	EIM	WIM	WEIM	SCW	CELULOSA
	(mmol/g)	(mmol/g)	(mmol/g)	(mmol/g)	(mmol/g)
Total, ácidos	2.285935684	2.1978022	3.44827586	2.03187251	9.35251799
Total, básicos	9.797007784	10.4371427	10.1885562	10.5289682	47.0925471
Fenólicos	4.968765573	4.71719708	5.99165126	4.87711061	23.9069734
Lactónicos	4.934382684	4.56181436	4.56317737	4.95378944	24.5544554
Carboxílicos	2.251552795	2.04241948	2.01980198	2.10855135	10

**Fuente:** Elaboración propia

Las diferencias en los resultados mostrados en la tabla 7 son consecuencia de los diferentes parámetros de aislamiento de cada uno de los materiales. Como primera comparación es posible visualizar que la cantidad de ácidos totales es menor a los básicos totales de todas las muestras analizadas.

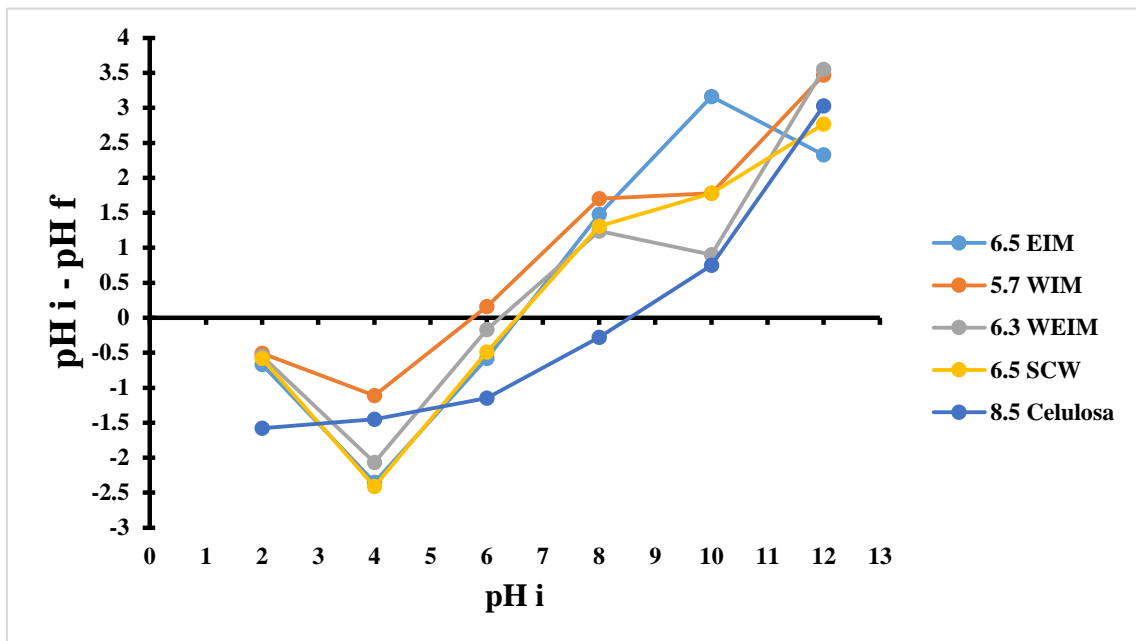
Respecto a la cantidad de grupos carboxílicos se visualiza un valor menor a 2.5 mmol/g para EIM, WIM, WEIM, SCW y de 10 mmol/g para celulosa, sin embargo, existe mayor presencia de grupos fenólicos los cuales le confieren a los materiales un carácter básico

El material de celulosa presenta valores por encima de los demás materiales debido al proceso de aislamiento que lleva a cabo, utilizando agentes ácidos y básicos muy fuertes como el hidróxido de sodio (NaOH) y el ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH), esto en particular es la causa principal de la generación de grupos oxigenados en la superficie del material.

### 3.2.7. Potencial de carga cero ( $pH_{pzc}$ )

Para la realización de este análisis se preparó la solución de NaCl a 0,01 M en rangos de pH 2 a 12, de tal forma los resultados se reflejan en el gráfico 8, se pueda observar el comportamiento del pH para cada uno de los materiales aislados del raquis de banano, en el grafico siguiente se muestran los resultados obtenidos.

**Gráfico 8.** Potencial de carga cero de los bioadsorbentes



**Condiciones:** Dosis: 1 g/L, Agitación: 200 rpm, Tiempo de contacto: 24 horas,  
Temperatura: ambiente (25 °C).

**Fuente:** Elaboración propia

En base a la gráfica 8, es posible visualizar el comportamiento de todos los materiales lignocelulósicos respecto al pH, el potencial de carga cero resultante para el material insoluble en etanol (EIM) fue de 6.5, para el material insoluble en agua (WIM) es obtuvo 5.7, para el material insoluble en etanol-agua (WEIM) el pzc fue de 6.3, para la pared celular secundaria (SCW) fue de 6.5 y para la celulosa se obtuvo 8.5 de pzc, estos valores indican que los bioadsorbentes al trabajar en condiciones menor a tales pH son más propensos a adsorber cationes como el cromo y a valores superiores a los aniones.

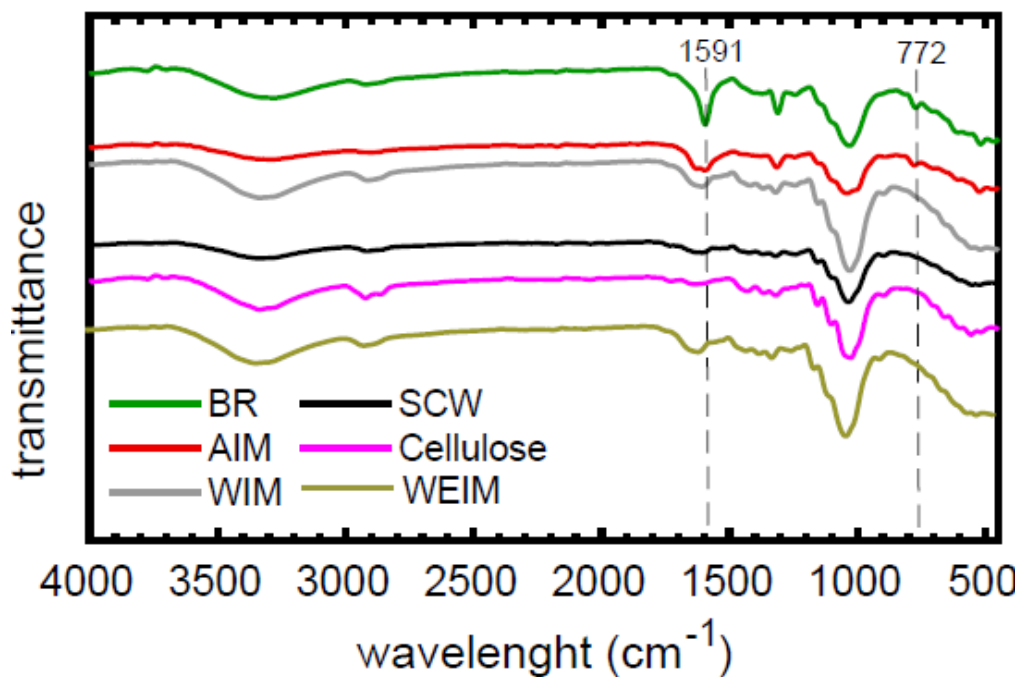
Por otro lado existen investigaciones con material lignocelulósico donde analizan el potencial de carga cero para la pared celular el cual fue de 6.6 para adsorción de iones de plomo y cadmio<sup>68</sup>, en otros resultados para celulosa de raquis de banano obtienen un pzc de 8.65 en la remoción de plomo<sup>39</sup>, valor similar al de este este trabajo, también existe otro estudio donde usan biomasa polimerizada a partir del raquis con un pzc 6.0<sup>69</sup> de cierta forma un valor aproximado a todos los puntos de carga cero de EIM, WIM, WEIM y SCW.

### 3.2.8. Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Este análisis tiene como objetivo revelar la estructura química a través de la identificación de los grupos funcionales presentes en la longitud de onda de los materiales lignocelulósicos inicialmente con el raquis de banano puro (BR) y los ya conocidos EIM, WIM, WEIM, SCW y Celulosa<sup>55</sup>.

Los materiales lignocelulósicos se componen principalmente de compuestos solubles y la pared celular secundaria. Para esta investigación, los materiales solubles se extrajeron por separado con etanol y agua. El etanol se puede utilizar para extraer clorofila, ceras y otros componentes menores, mientras que los materiales solubles en agua pueden incluir azúcares no estructurales, material inorgánico<sup>71</sup>. Por otro lado, la pared celular secundaria contiene tres biopolímeros principales como la celulosa, la lignina y la hemicelulosa. El gráfico 9 muestra los espectros FTIR de los materiales evaluados.

**Gráfico 9.** Longitud de onda y transmitancia de los bioadsorbentes



**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede visualizar en el gráfico 9 los materiales se analizaron en un rango de longitud de onda de 500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , por otro lado, se presentan los espectros IR de los bioadsorbentes aislados, donde se muestran marcadas diferencias en los grupos funcionales. El raquis de banano puro (BR) y el material insoluble en etanol (EIM)

presentan bandas relativamente similares en los picos  $1591\text{ cm}^{-1}$  y  $772\text{ cm}^{-1}$ ; previamente atribuido a las vibraciones de los grupos funcionales carboxílicos  $\text{COO}^-$  y enlaces carbono-carbono  $\text{C} = \text{C}$ . Por otro lado el material insoluble en agua (WIM), material insoluble en etanol-agua (WEIM) y la pared celular secundaria (SCW) presentan un cambio en la banda de  $1591\text{ cm}^{-1}$  a  $1606\text{ cm}^{-1}$ , y la celulosa también muestra este cambio en  $1630\text{ cm}^{-1}$  y  $1603\text{ cm}^{-1}$ . Además, las vibraciones a  $772\text{ cm}^{-1}$  no están presentes en WIM, SCW y celulosa. La pérdida de intensidad en la vibración a  $1311\text{ cm}^{-1}$  (vibración de balanceo de  $\text{CH}_2$  en C6) también es digna de mención.

En general, este análisis nos permitió conocer los factores de la pérdida de capacidad de adsorción que se produce por los cambios (desplazamiento, disminución de la intensidad) en los grupos funcionales de los materiales aislados los cuales juegan un papel importante en la adsorción de cromo, particularmente aquellos relacionados con los grupos carboxilo ( $1591\text{ cm}^{-1}$ ) y  $\text{C} = \text{C}$  flexión ( $772\text{ cm}^{-1}$ ).

La presencia de los grupos hidroxilos se los pueden observar aproximadamente en  $3300\text{ cm}^{-1}$  con una adsorción amplia para el raquis puro (BR), WIM, WEIM y celulosa, sin embargo, la vibración disminuye para EIM y SWC con un pico casi inexistente.

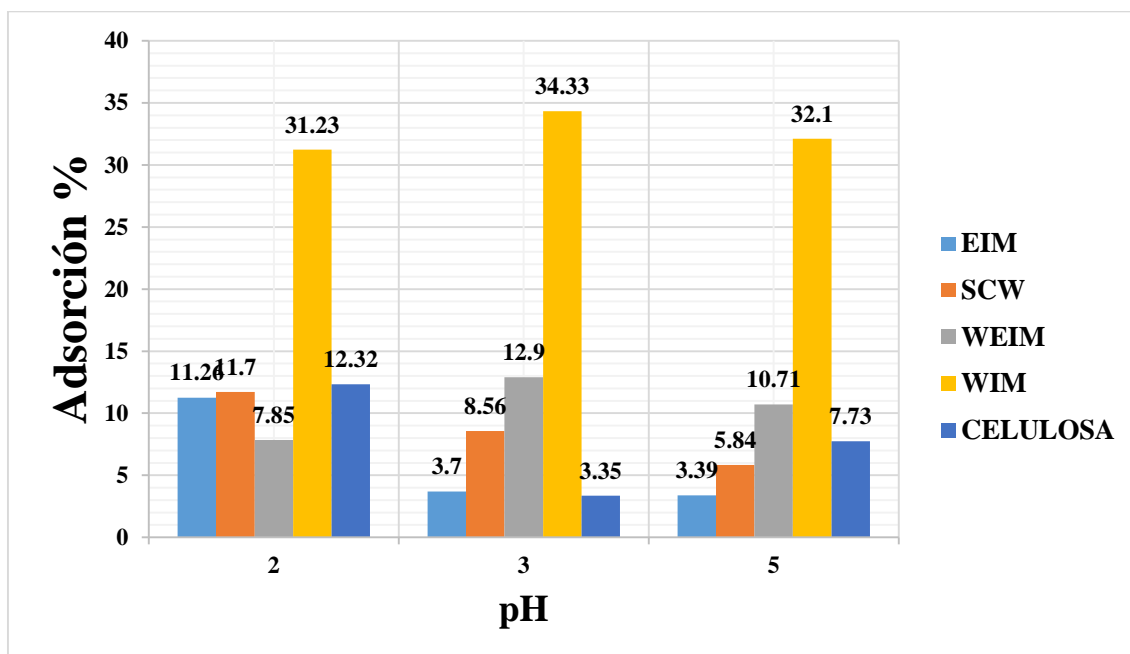
Los picos presentes en  $2900\text{ cm}^{-1}$  hacen referencia a una vibración baja del grupo  $\text{C-H}$ , por otro lado, existe una banda entre  $900$  y  $1100\text{ cm}^{-1}$  que corresponde al grupo  $\text{C-O}$  de alcoholes y fenoles presente en todos los materiales analizados.

### **3.3. Estudio de pH**

Para llevar a cabo el estudio de pH con cromo (Cr) se trabajó con tres valores diferentes de pH 2, 3 y 5 para cada uno de los materiales lignocelulósicos aislados: EIM, WIM, WEIM, SCW y celulosa, como se observa en la gráfica 10 el material insoluble en agua (WIM) presentó un mejor comportamiento en relación con todos los adsorbentes y pHs, obteniendo una % de adsorción de 34.33 a pH 3. Si se analiza la capacidad de adsorción de cada material respecto al pH, el material EIM, SCW y celulosa tienen una mejor captación a pH 2 mientras el material WEIM y WIM en pH 3.



**Gráfico 10.** Efecto del pH en la capacidad de adsorción de los bioadsorbentes



**Condiciones:** Dosis: 1 g/L, Agitación: 200 rpm, Tiempo de contacto: 24 horas, Temperatura: ambiente (25 °C), Concentración inicial: 50 ppm.

**Fuente:** Elaboración propia

Cuando se trabaja en la adsorción de cromo lo recomendable es hacerlo a valores de pHs menor a 6, debido a que en un rango de 1 a 6 las especies de cromo coexisten en varias formas ya sea como ion dicromato  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , ion cromato  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}_3\text{O}_{10}^{2-}$  y ion tetracromato  $\text{Cr}_4\text{O}_{13}^{2-}$  de los cuales predomina  $\text{HCrO}_4^{2-}$ .

Los resultados obtenidos del estudio de pH coinciden con algunos trabajados para la remoción de cromo donde utilizan bioadsorbentes como por ejemplo: la utilización de cascara de banana químicamente modificad a un pH óptimo de 3<sup>2</sup>, cascara de banana a un pH 2<sup>25</sup>, lignina pH 2<sup>72</sup> y cascara de yuca a un pH 3<sup>73</sup>.

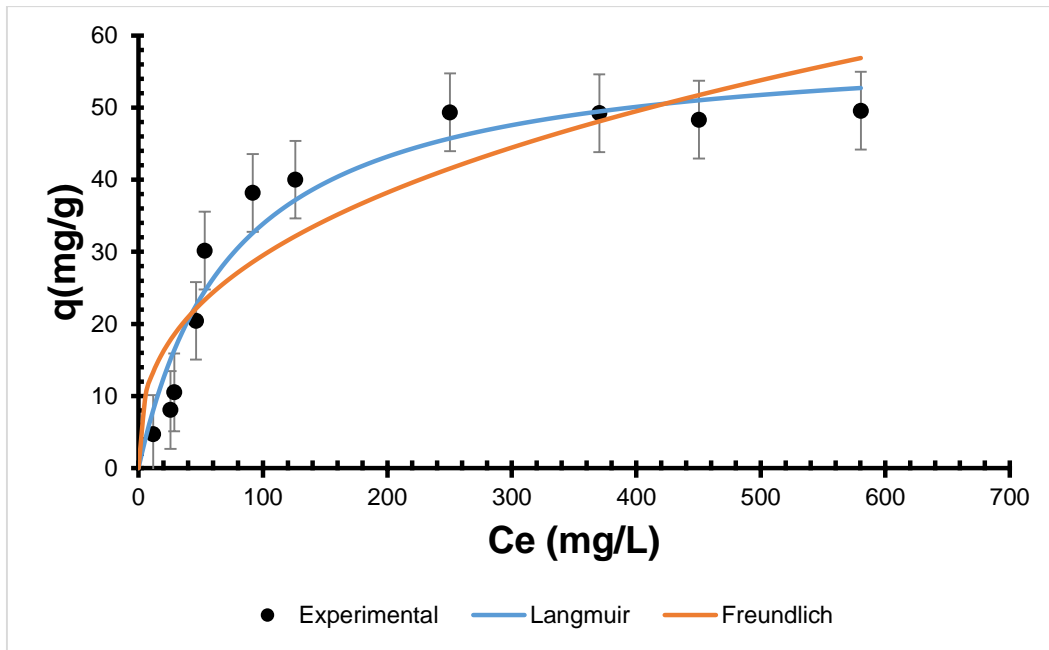
### 3.4. Estudio de equilibrio

Este estudio permite analizar la interacción entre el adsorbato y el bioadsorbente hasta alcanzar un instante de equilibrio, de esta forma a través de la aplicación de modelos matemáticos poder establecer la capacidad máxima de adsorción.

### 3.4.1. Isoterma de Material Insoluble en Etanol (EIM)

El siguiente estudio permite visualizar la capacidad de adsorción de Cromo (Cr) a través del material EIM, y la gráfica 11 demuestra que el valor de  $Q_{\max}$  mediante el modelo matemático no lineal de Langmuir fue de 59.62 mg de Cr/g de bioadsorbente.

**Gráfico 11.** Isoterma de EIM



**Condiciones:** Dosis 1 g/L, Volumen 25 mL, Temperatura 25°C, Tiempo de contacto 24 horas, Agitación 150 rpm, pH 2.

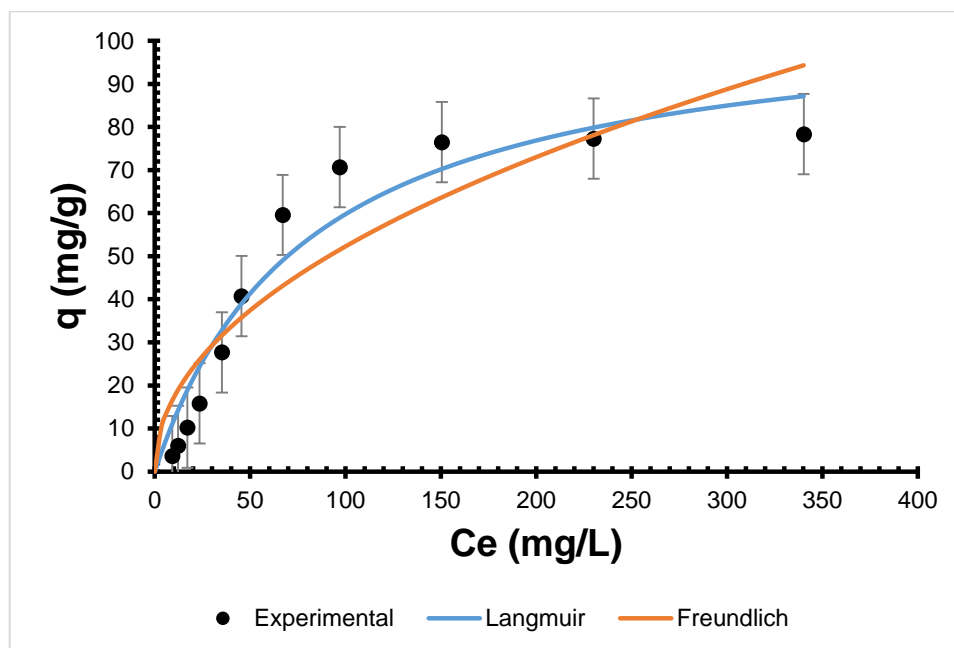
**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados del estudio de Cromo (Cr) fueron analizados mediante los modelos matemáticos no lineales de Langmuir y Freundlich, obteniendo un mejor ajuste de la isoterma experimental con el modelo de la isoterma de Langmuir con un  $R^2 = 0.95$  y  $Q_{\max} = 59.62$  mg/g.

### 3.4.2. Isoterma de Material Insoluble en Agua (WIM)

El estudio que a continuación se describe refleja la capacidad de adsorción del cromo (Cr) a través del material WIM, la gráfica 12 demuestra que el valor de  $Q_{\max}$  mediante el modelo matemático no lineal de Langmuir fue de 107.68 mg de Cr/g de bioadsorbente.

**Gráfico 12.** Isoterma de WIM



**Condiciones:** Dosis 1 g/L, Volumen 25 mL, Temperatura 25°C, Tiempo de contacto 24 horas, Agitación 150 rpm, pH 3.

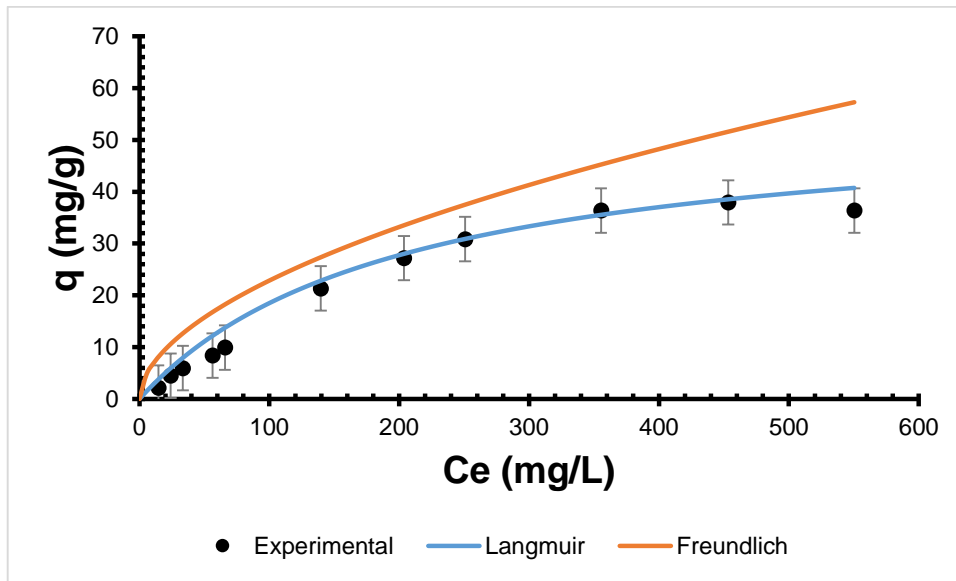
**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados del estudio de Cromo (Cr) fueron analizados mediante los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich, obteniendo un mejor ajuste a través del isoterma de Langmuir con un  $R^2 = 0.93$  y  $Q_{\max} = 107.68$  mg/g.

### **3.4.3. Isoterma de Material Insoluble en Etanol-Agua (WEIM)**

El presente estudio permite visualizar la capacidad de adsorción de Cromo (Cr) a través del material WEIM, la gráfica 13 demuestra que el valor de  $Q_{\max}$  mediante el modelo matemático no lineal de Langmuir fue de 55.56 mg de Cr/g de bioadsorbente.

**Gráfico 13.** Isoterma de WEIM



**Condiciones:** Dosis 1 g/L, Volumen 25 mL, Temperatura 25°C, Tiempo de contacto 24 horas, Agitación 150 rpm, pH 3.

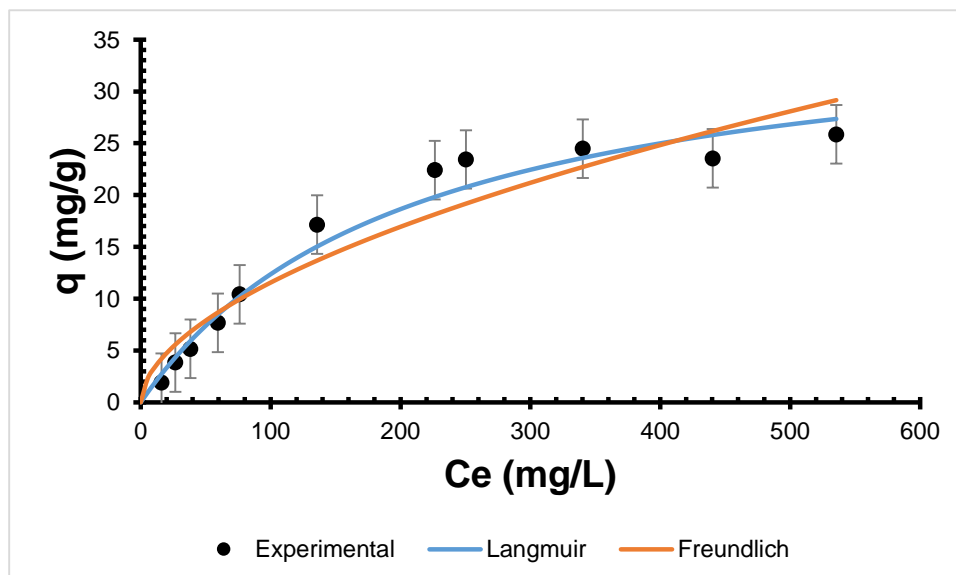
**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados del estudio de Cromo (Cr) fueron analizados mediante los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich, obteniendo un mejor ajuste a través del isoterma de Langmuir con un  $R^2 = 0.95$  y  $Q_{\max} = 55.56 \text{ mg/g}$ .

#### 3.4.4. Isoterma de Pared Celular Secundaria (SCW)

El estudio siguiente permite visualizar la capacidad de adsorción de Cromo (Cr) a través del material SCW, la gráfica 14 demuestra que el valor de  $Q_{\max}$  mediante el modelo matemático no lineal de Langmuir fue de 37.89 mg de Cr/g de bioadsorbente.

**Gráfico 14.** Isoterma de SCW



**Condiciones:** Dosis 1 g/L, Volumen 25 mL, Temperatura 25°C, Tiempo de contacto 24 horas, Agitación 150 rpm, pH 2.

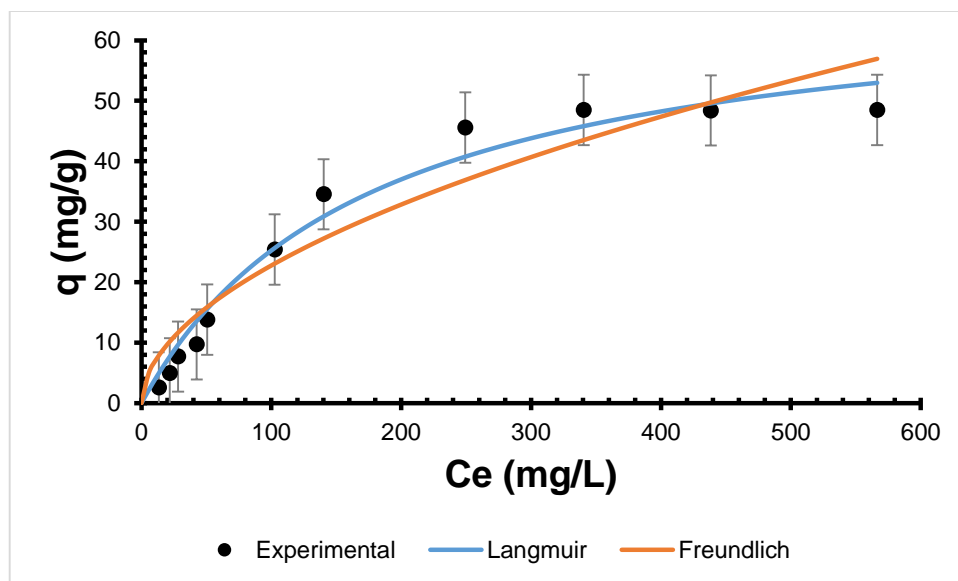
**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados del estudio de Cromo (Cr) fueron analizados mediante los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich, obteniendo un mejor ajuste a través del isoterma de Langmuir con un  $R^2 = 0.95$  y  $Q_{\max} = 37.89$  mg/g.

### 3.4.5. Isoterma de Celulosa

El estudio siguiente permite visualizar la capacidad de adsorción de Cromo (Cr) a través del material Celulosa, la gráfica 15 demuestra que el valor de  $Q_{\max}$  mediante el modelo matemático no lineal de Langmuir fue de 69.30 mg de Cr/g de bioadsorbente.

**Gráfico 15.** Isoterma de Celulosa



**Condiciones:** Dosis 1 g/L, Volumen 25 mL, Temperatura 25°C, Tiempo de contacto 24 horas, Agitación 150 rpm, pH 2.

**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados del estudio de Cromo (Cr) fueron analizados mediante los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich, obteniendo un mejor ajuste a través del isoterma de Langmuir con un  $R^2 = 0.97$  y  $Q_{\max} = 69.30$  mg/g.

En tabla 8, se presenta un resumen de los valores obtenidos de los diferentes modelos matemáticos aplicados a cada material bioadsorbente usando el software Origin 8.0.

**Tabla 8.** Resultados generales de las isotermas para Cromo (Cr)

Resultados de isotermas para Cromo (Cr)							
Modelos Matemáticos	Parámetros	Unidades	Materiales				
			EIM	WIM	WEI M	SCW	CELULOS A
<b>Langmuir</b>	$Q_{max}$	mg/g	59.62	107.6	55.56	37.85	69.3
	b		0.013	0.012	0.001	0.001	0.0011
	$R^2$		0.95	0.93	0.95	0.95	0.97
<b>Freundlich</b>	$k_f$	mg/g	8.29	8.67	3.91	2.88	4.99
	n		2.68	2.07	1.85	1.81	1.89
	$R^2$		0.8	0.83	0.93	0.9	0.91

**Fuente:** Elaboración propia

El modelo Isotérmico de Langmuir muestra un mejor ajuste en todos los materiales bioadsorbentes con respecto a la isoterma experimental; además, la capacidad de adsorción máxima está muy por arriba en referencia a los valores de  $k_f$  valor obtenido del modelo de la Isoterma de Freundlich.

**Tabla 9.** Cuadro comparativo de diferentes materiales bioadsorbentes para adsorción Cromo (Cr).

Material	Condiciones				Referencia
	pH	Temperatura °C	Modelo	Qmax (mg/g)	
Quitosano	4	25	Langmuir	52.2	<sup>74</sup>
Cáscara de naranja	4	23	Elovich	40.23	<sup>75</sup>
Cáscara de naranja modificada con quitosano	3	30	Freundlich	254.7	<sup>76</sup>
Cáscara de plátano	1.88	25	Langmuir	36.1	<sup>77</sup>
Raspón de uva	4	25	Langmuir	64.4	<sup>78</sup>
Cáscara de Cacao modificada con ácido nítrico	2	25	Langmuir	115.28	<sup>79</sup>
Cáscara de banano	3	24	Langmuir	6.17	<sup>2</sup>

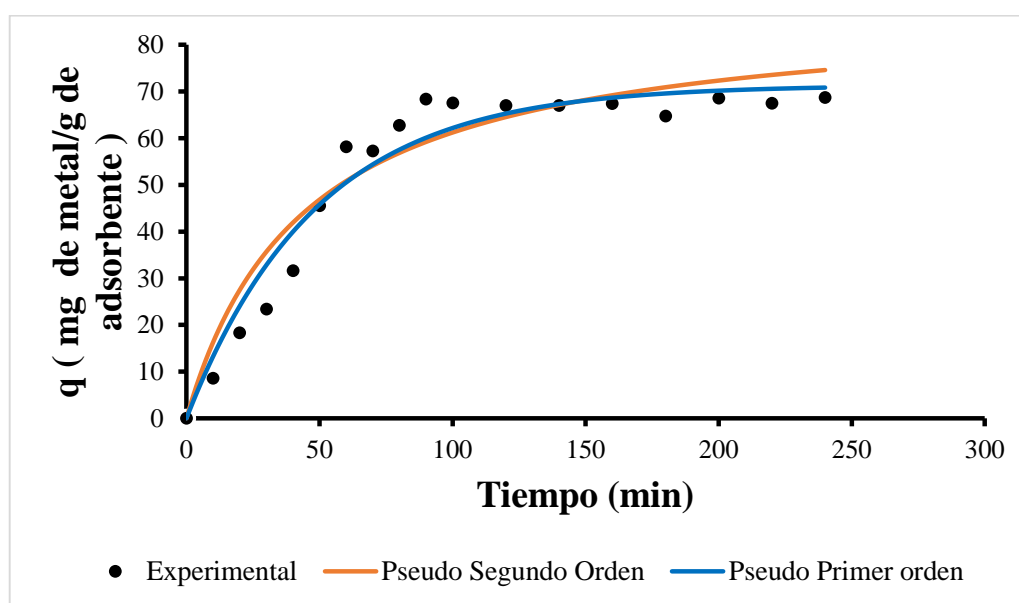
**Fuente:** Elaboración propia

Existen otras investigaciones que utilizan bioadsorbentes para la recuperación de cromo como se observa en la tabla 9, la mayoría trabaja a temperatura ambiente y condiciones de pH ácidos, por otro lado, es importante destacar la capacidad de adsorción del material WIM que es superior a algunos adsorbentes señalados en esta tabla entre ellos el quitosano, cáscara de naranja, cáscara de plátano y de banano.

### 3.5. Cinética de adsorción de cromo (Cr)

El estudio de cinética se encarga de analizar el comportamiento entre el adsorbato y adsorbente, permite conocer la velocidad con la que el metal se adhiere en la superficie del material bioadsorbente<sup>80</sup>, en la gráfica 16 es posible visualizar los datos experimentales obtenidos para determinar la adsorción de cromo (Cr) a través de los materiales con respecto al tiempo:

**Gráfico 16.** Cinética de cromo (Cr) en WIM



**Condiciones:** Dosis 1g/L, Volumen 500 ml, Temperatura 25°C, Tiempo de contacto 4 h, Agitación 150 rpm, Concentración 100ppm, pH inicial 3.

**Fuente:** Elaboración propia

En el estudio de cinética se llevó a cabo la aplicación de modelación matemática, en este caso las ecuaciones utilizadas fueron: Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden, estos modelos permiten tener una mejor visión del fenómeno ocurrido, los resultados obtenidos indican que el modelo matemático Pseudo primer orden fue el que mejor se ajustó a los resultados obtenidos con  $q_e=71.37$  mg/g y un  $R^2=0.94$  para el material insoluble en agua (WIM).



**Tabla 10.** Parámetros de los modelos cinéticos ajustados para el Cromo (Cr)

Modelo	$q_e$ (mg/g)	$K_2$	$R^2$
<b>Pseudo primer orden</b>	71.36	0.02005	0.94
<b>Pseudo segundo orden</b>	88.41	0.00254	0.89

**Fuente:** Elaboración propia

Los resultados obtenidos en este estudio de cinética coinciden con <sup>2</sup> donde alcanzan una máxima remoción de cromo hexavalente Cr(VI) a los 60 minutos a un pH de 3 utilizando cáscara de banano modificada químicamente, a diferencia de <sup>77</sup> donde en 30 minutos llegan a un punto de equilibrio aplicando cascara de plátano, el fenómeno de la variación del tiempo entre ambos materiales junto con el material insoluble en agua (WIM) que se está usando en este estudio, se debe en su mayoría a la disposición de sitios activos para retener más fácil el catión cromo, una vez que los sitios activos se saturan la adsorción llega a un punto donde es la misma en el tiempo que resta del experimento, como también depende de la concentración inicial del metal.

Existen otras investigaciones que utilizan material lignocelulósico con otros metales como por ejemplo: <sup>69</sup> utilizó como material raquis de banano puro para la adsorción de cadmio en un tiempo de 4 h, obteniendo un  $q_e=41.65$  mg/g y  $R^2=0.76$  valores inferiores a los resultantes en este trabajo; mientras que <sup>68</sup> alcanza un  $q_e=69.4$  mg/g y  $R^2=0.94$  utilizando pared celular de raquis de banano.

#### 4. CAPITULO IV: CONCLUSIONES

- Fue posible obtener cinco materiales a partir del raquis de banano: Material insoluble en etanol (EIM), Material insoluble en agua (WIM), Material insoluble en etanol-agua (WEIM), Pared celular secundaria (SCW) y Celulosa.
- La caracterización de material se realizó respecto a extraíbles, holocelulosa, hemicelulosa, celulosa y lignina. Mediante la aplicación de Titulación Boehm e Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) fue posible detectar varios grupos funcionales en la superficie de los adsorbentes como: carboxílicos, hidroxilos, fenólicos y lactónicos de cada uno de los cinco materiales aislados.
- En el estudio de equilibrio de los cinco adsorbentes analizados todos se ajustaron al modelo no lineal de Langmuir: EIM con  $Q_{\max}= 59.62$  mg/g, WIM con  $Q_{\max}= 107.68$  mg/g, WEIM con  $Q_{\max}= 55.56$  mg/g, SCW con  $Q_{\max}= 37.85$  mg/g, y Celulosa con  $Q_{\max}= 69.3$  mg/g.
- El estudio de adsorción determinó que el material insoluble en agua (WIM) presentó una mejor capacidad para recuperar cromo (Cr) de una solución acuosa respecto a los demás materiales, por otro lado, muestra más eficiencia en relación a adsorbentes de otras investigaciones como cascara de naranja, raspón de uva, cascara de plátano etc.

## **5. CAPITULO V: RECOMENDACIONES**

- En base a la variedad de materiales obtenidos a partir del raquis de banano y la capacidad de remoción del cromo (Cr) se recomienda el uso de estos para remover otros metales pesados como el cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As).
- Realizar los respectivos estudios de cinética de los demás materiales para tener información más precisa respecto al comportamiento en relación con el tiempo.
- Llevar a cabo estudios de adsorción y desorción para determinar la reusabilidad y capacidad de desorción de cada material

## BIBLIOGRAFIA

- (1) Dick, L. F. P.; Takimi, A. S.; Melo, Y. R.; Dick, P. A. Processo de Anodização Em Eletrólito Livre de Cromo VI Para Alumínio e Suas Ligas. **2017**, No. October, 1–12.
- (2) Ali, A.; Saeed, K.; Mabood, F. Removal of Chromium (VI) from Aqueous Medium Using Chemically Modified Banana Peels as Efficient Low-Cost Adsorbent. *Alexandria Eng. J.* **2016**, 55 (3), 2933–2942. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.011>.
- (3) Boeykens, S.; Saralegui, A. B. Adsorción de Cromo ( VI ) y Plomo ( II ) Sobre Biomasa de Carozos de Palta. **2017**, No. July 2018, 3–4.
- (4) Rivera-Martínez, E.; Cárdenas-González, J. F.; Martínez-Juárez, V. M.; Acosta-Rodríguez, I. Remoción de Cromo (VI) Por Una Cepa de Aspergillus Niger Resistente a Cromato. *Inf. Tecnol.* **2015**, 26 (4), 13–20. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000400003>.
- (5) Cortes, W. Materiales Lignocelulosicos Como Fuente De Biocombustibles Y Productos Químicos. *Cienc. y Tecnol. Aeronáutica* **2011**, 16, 43–44.
- (6) Salman, M.; Athar, M.; Farooq, U. Biosorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions Using Indigenous and Modified Lignocellulosic Materials. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **2015**, 14 (2), 211–228. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9362-x>.
- (7) Sahmoune, M. N. Performance of Streptomyces Rimosus Biomass in Biosorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions. *Microchem. J.* **2018**, 141 (2017), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.05.009>.
- (8) Oro, M. Minería Del Oro. **2015**, No. May. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3159.6968>.
- (9) Lu, Z.; Ouyang, X.; Zhang, W.; Lu, F. Isolation of Cr(VI) Resistant Bacteria and Exploration of Cr(VI) Removal Mechanism of Strain n-9. *Appl. Mech. Mater.* **2013**, 295–298, 74–77. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.295-298.74>.
- (10) Jobby, R.; Jha, P.; Yadav, A. K.; Desai, N. Biosorption and Biotransformation of

- Hexavalent Chromium [Cr(VI)]: A Comprehensive Review. *Chemosphere* **2018**, 207 (Vi), 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.050>.
- (11) Medina, M. Determinación de Cromo Hexavalente En Descargas de Aguas Residuales de Una Curtiembre Ubicada En Ek Sectir de Izamba- Ambato Mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica. *Pontif. Univerisdad Católica del Ecuador* **2010**, 9 (1), 76–99.
- (12) Dehghani, M. H.; Sanaei, D.; Ali, I.; Bhatnagar, A. Removal of Chromium(VI) from Aqueous Solution Using Treated Waste Newspaper as a Low-Cost Adsorbent: Kinetic Modeling and Isotherm Studies. *J. Mol. Liq.* **2016**, 215, 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.12.057>.
- (13) FAO. Banana Market Review and Banana Statistics 2012-2013 Market. *Intergov. Gr. Banan. Trop. Fruits* **2014**, No. February, 1–6.
- (14) Cobos, O. F. H.; Londoño, J. F. A.; Garcia, L. C. F. Design of a Biofilter to Reduce the Contamination Content by Chromium Generated in the Industries of the Leather Tanning. *Dyna* **2009**, 76 (160), 107–119.
- (15) Brüggemann, J. Jürgen Tiews Zum Gedenken. *Zeitschrift für Tierphysiologie Tierernährung und Futtermittelkd.* **1973**, 31 (1–5), 169–170. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.1973.tb01276.x>.
- (16) Bose, S. K.; Chakraborty, U. C. Resolutions Adopted at the General Session of the VIII All India Pediatric Conference at Vellore on the 21st December, 1956. *Indian J. Pediatr.* **1957**, 24 (1), 14. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>.
- (17) Lunk, H. J. Discovery, Properties and Applications of Chromium and Its Compounds. *ChemTexts* **2015**, 1 (1). <https://doi.org/10.1007/s40828-015-0007-z>.
- (18) Nigam, H.; Das, M.; Chauhan, S.; Pandey, P.; Swati, P.; Yadav, M.; Tiwari, A. Effect of Chromium Generated by Solid Waste of Tannery and Microbial Degradation of Chromium to Reduce Its Toxicity: A Review. *Pelagia Res. Libr.* **2015**, 6 (3), 129–136.
- (19) Islam, M. S.; Ahmed, M. K.; Raknuzzaman, M.; Habibullah -Al- Mamun, M.; Islam, M. K. Heavy Metal Pollution in Surface Water and Sediment: A Preliminary Assessment of an Urban River in a Developing Country. *Ecol. Indic.*

- 2015**, 48, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016>.
- (20) RoyChowdhury, A.; Datta, R.; Sarkar, D. *Heavy Metal Pollution and Remediation*; Elsevier Inc., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00015-7>.
- (21) Bhalerao, S. A.; Sharma, A. S. Review Article Chromium : As an Environmental Pollutant. **2015**, 4 (4), 732–746.
- (22) Wang, X.; Xu, J.; Liu, J.; Liu, J.; Xia, F.; Wang, C.; Dahlgren, R. A.; Liu, W. Mechanism of Cr(VI) Removal by Magnetic Greigite/Biochar Composites. *Sci. Total Environ.* **2020**, 700 (Vi), 134414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134414>.
- (23) Welling, R.; Beaumont, J. J.; Petersen, S. J.; Alexeeff, G. V.; Steinmaus, C. Chromium VI and Stomach Cancer: A Meta-Analysis of the Current Epidemiological Evidence. *Occup. Environ. Med.* **2015**, 72 (2), 151–159. <https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102178>.
- (24) Tulsma. Libro VI - Anexo 1. *Tulsma* **2011**, 8–9.
- (25) Memon, J. R.; Memon, S. Q.; Bhangar, M. I.; El-Turki, A.; Hallam, K. R.; Allen, G. C. Banana Peel: A Green and Economical Sorbent for the Selective Removal of Cr(VI) from Industrial Wastewater. *Colloids Surfaces B Biointerfaces* **2009**, 70 (2), 232–237. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.12.032>.
- (26) Bilal, M.; Wang, Z.; Cui, J.; Ferreira, L. F. R.; Bharagava, R. N.; Iqbal, H. M. N. Environmental Impact of Lignocellulosic Wastes and Their Effective Exploitation as Smart Carriers – A Drive towards Greener and Eco-Friendlier Biocatalytic Systems. *Sci. Total Environ.* **2020**, 722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137903>.
- (27) Castillo, A.; Castillo, A. A.; Delgado, R. S.; Hernández, E. G.; Domínguez, M. M.; Baeza, J. M. G.; Cruz, A. A.; García, R. C.; Morales, A.; Franco, P. J. H.; Claveríe, A. L.; Martínez, A. M. M. Aprovechamiento Integral de Los Productos Lignocelulosicos. *Rev. Iberoam. Polímeros* **2012**, 13 (4), 140–150.
- (28) Torres Jaramillo, D.; Morales Vélez, S. P.; Quintero Díaz, J. C. Evaluación de Pretratamientos Químicos Sobre Materiales Lignocelulósicos. *Ingeniare* **2017**, 25

- (4), 733–743. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000400733>.
- (29) Reales, J. G.; Castaño, H. I.; Zapata, J. E. Evaluación de Tres Métodos de Pretratamiento Químico Sobre La Deslignificación de Tallos de Yuca. *Inf. Tecnol.* **2016**, *27* (3), 11–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000300003>.
- (30) Kamdem, I.; Hiligsmann, S.; Vanderghem, C.; Jacquet, N.; Tiappi, F. M.; Richel, A.; Jacques, P.; Thonart, P. Enhanced Biogas Production During Anaerobic Digestion of Steam-Pretreated Lignocellulosic Biomass from Williams Cavendish Banana Plants. *Waste and Biomass Valorization* **2018**, *9* (2), 175–185. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9788-6>.
- (31) Florian, M.; Deumaga, T.; Jacquet, N.; Vanderghem, C.; Aguedo, M.; Guy, H.; Patrick, T.; Magali, G.; Aurore, D. Fractionation and Structural Characterization of Hemicellulose from Steam-Exploded Banana Rachis. *Waste and Biomass Valorization* **2018**, *0* (0), 0. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0457-9>.
- (32) Florian, T. D. M.; Villani, N.; Aguedo, M.; Jacquet, N.; Thomas, H. G.; Gerin, P.; Magali, D.; Richel, A. Chemical Composition Analysis and Structural Features of Banana Rachis Lignin Extracted by Two Organosolv Methods. *Ind. Crops Prod.* **2019**, *132* (September 2018), 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.022>.
- (33) Cortes, W. Tratamientos Aplicables a Materiales Lignocelulósicos Para La Obtención de Etanol y Productos Químicos. *Rev. Tecnol.* **2015**, *13*, 39–44.
- (34) Liu, H.; Chen, X.; Ji, G.; Yu, H.; Gao, C.; Han, L.; Xiao, W. Mechanochemical Deconstruction of Lignocellulosic Cell Wall Polymers with Ball-Milling. *Bioresour. Technol.* **2019**, *286* (April), 121364. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121364>.
- (35) Hai, T. A. P.; Sugimoto, R. Surface Functionalization of Cellulose with Poly(3-Hexylthiophene) via Novel Oxidative Polymerization. *Carbohydr. Polym.* **2018**, *179*, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.067>.
- (36) Zuluaga, R.; Putaux, J. L.; Cruz, J.; Vélez, J.; Mondragon, I.; Gañán, P. Cellulose Microfibrils from Banana Rachis: Effect of Alkaline Treatments on Structural and Morphological Features. *Carbohydr. Polym.* **2009**, *76* (1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.024>.

- (37) Abramson, M.; Shoseyov, O.; Shani, Z. Plant Cell Wall Reconstruction toward Improved Lignocellulosic Production and Processability. *Plant Sci.* **2010**, *178* (2), 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.11.003>.
- (38) Lapo, B.; Bou, J. J.; Hoyo, J.; Carrillo, M.; Peña, K.; Tzanov, T.; Sastre, A. M. A Potential Lignocellulosic Biomass Based on Banana Waste for Critical Rare Earths Recovery from Aqueous Solutions. *Environ. Pollut.* **2020**, *264*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114409>.
- (39) Paladines, D.; Tinoco, B. Obtención de Celulosa a Partir de Raquis de Banano Aplicado a La Remoción de Plomo y Cadmio En Solución Acuosa. **2019**, 19–27.
- (40) Thommes, M.; Kaneko, K.; Neimark, A. V.; Olivier, J. P.; Rodriguez-Reinoso, F.; Rouquerol, J.; Sing, K. S. W. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* **2015**, *87* (9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
- (41) Sun, J. X.; Sun, X. F.; Zhao, H.; Sun, R. C. Isolation and Characterization of Cellulose from Sugarcane Bagasse. *Polym. Degrad. Stab.* **2004**, *84* (2), 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.008>.
- (42) Fomina, M.; Gadd, G. M. Biosorption: Current Perspectives on Concept, Definition and Application. *Bioresour. Technol.* **2013**. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>.
- (43) Daniel, A.; Vullo, D. L.; Ceretti, H. M.; Zalts, A.; Ramı, S. A. M. Cadmium , Zinc and Copper Biosorption Mediated by *Pseudomonas Veronii* 2E. **2008**, *99*, 5574–5581. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.060>.
- (44) Vijayaraghavan, K.; Yun, Y. Bacterial Biosorbents and Biosorption. **2008**, *26*, 266–291. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.02.002>.
- (45) Boehm Titration Revisited (Part I): Practical Aspects for Achieving a High Precision in Quantifying Oxygen-Containing Surface Groups on Carbon Materials. *C* **2018**, *4* (2), 21. <https://doi.org/10.3390/c4020021>.
- (46) Fidel, R. B.; Laird, D. A.; Thompson, M. L. Evaluation of Modified Boehm Titration Methods for Use with Biochars. *J. Environ. Qual.* **2013**, *42* (6), 1771–



1778. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.07.0285>.
- (47) Bakatula, E. N.; Richard, D.; Neculita, C. M.; Zagury, G. J. Determination of Point of Zero Charge of Natural Organic Materials. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2018**, *25* (8), 7823–7833. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1115-7>.
- (48) Fiol, N.; Villaescusa, I. Determination of Sorbent Point Zero Charge: Usefulness in Sorption Studies. *Environ. Chem. Lett.* **2009**, *7* (1), 79–84. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0139-0>.
- (49) De Andrade, J. R.; Oliveira, M. F.; Da Silva, M. G. C.; Vieira, M. G. A. Adsorption of Pharmaceuticals from Water and Wastewater Using Nonconventional Low-Cost Materials: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2018**, *57* (9), 3103–3127. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b05137>.
- (50) Maleki, A.; Hayati, B.; Naghizadeh, M.; Joo, S. W. Adsorption of Hexavalent Chromium by Metal Organic Frameworks from Aqueous Solution. *J. Ind. Eng. Chem.* **2015**, *28*, 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.02.016>.
- (51) Li, H.; Dong, X.; da Silva, E. B.; de Oliveira, L. M.; Chen, Y.; Ma, L. Q. Mechanisms of Metal Sorption by Biochars: Biochar Characteristics and Modifications. *Chemosphere* **2017**, *178*, 466–478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>.
- (52) Ogata, T.; Narita, H.; Tanaka, M. Adsorption Behavior of Rare Earth Elements on Silica Gel Modified with Diglycol Amic Acid. *Hydrometallurgy* **2015**, *152*, 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.01.005>.
- (53) Cepeda, E. A.; Iriarte, U.; Sierra, I. Kinetic and Thermodynamic Study of Chlorobenzene Adsorption from Aqueous Solutions onto Granular Activated Carbon. *Lat. Am. Appl. Res.* **2014**, *44* (2), 141–147.
- (54) Sala, L.; Figueira, F. S.; Cerveira, G. P.; Moraes, C. C.; Kalil, S. J. Kinetics and Adsorption Isotherm of C-Phycocyanin from *Spirulina Platensis* on Ion-Exchange Resins. *Brazilian J. Chem. Eng.* **2014**, *31* (4), 1013–1022. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140314s00002443>.
- (55) Costa, T. B. da; Silva, M. G. C. da; Vieira, M. G. A. Recovery of Rare-Earth Metals from Aqueous Solutions by Bio/Adsorption Using Non-Conventional

- Materials: A Review with Recent Studies and Promising Approaches in Column Applications. *J. Rare Earths* **2020**, *38* (4), 339–355.  
<https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.06.001>.
- (56) Bai, R. S.; Abraham, T. E. Studies on Enhancement of Cr(VI) Biosorption by Chemically Modified Biomass of *Rhizopus Nigricans*. *Water Res.* **2002**, *36* (5), 1224–1236. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00330-X).
- (57) Anastopoulos, I.; Bhatnagar, A.; Lima, E. C. Adsorption of Rare Earth Metals: A Review of Recent Literature. *J. Mol. Liq.* **2016**, *221*, 954–962.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.076>.
- (58) Zhao, L.; Duan, X.; Azhar, M. R.; Sun, H.; Fang, X.; Wang, S. Selective Adsorption of Rare Earth Ions from Aqueous Solution on Metal-Organic Framework HKUST-1. *Chem. Eng. J. Adv.* **2020**, No. July, 100009.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100009>.
- (59) Sluiter, a; Ruiz, R.; Scarlata, C.; Sluiter, J.; Templeton, D. Determination of Extractives in Biomass Laboratory Analytical Procedure ( LAP ) Issue Date : 7 / 17 / 2005 Determination of Extractives in Biomass Laboratory Analytical Procedure ( LAP ). *Natl. Renew. Energy Lab.* **2005**, No. January, 12.
- (60) Rebaque, D.; Martínez-Rubio, R.; Fornalé, S.; García-Angulo, P.; Alonso-Simón, A.; Álvarez, J. M.; Caparros-Ruiz, D.; Acebes, J. L.; Encina, A. Characterization of Structural Cell Wall Polysaccharides in Cattail (*Typha Latifolia*): Evaluation as Potential Biofuel Feedstock. *Carbohydr. Polym.* **2017**, *175*, 679–688.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.021>.
- (61) Briceño, N. O.; Guzmán, M. Y.; Díaz, J. de J. Surface Groups on Carbonaceous Materials.Characterization By Different Techniques. *Rev. Colomb. Química* **2007**, *36* (1), 121–130.
- (62) Estupiñan, P. R.; Giraldo, L.; Moreno-Piraján, J. C. Modificación de La Química Superficial de Carbones Activados. Efecto de La Oxidación Con Soluciones de HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Sobre La Remoción de Cadmio (II) En Solución Acuosa. *Afinidad* **2014**, *71* (565), 49–56.
- (63) Amador, J. Pentandra , Hevea Brasiliensis y Ochroma Pyramidale. **2015**.

- (64) Palacios, M. G. Caracterización Química de La Biomasa Procedente de Las Hojas, Pseudotallo, Raquis y Pseudopeciolo de La Planta de Banano y Su Relación Con El Poder Calorífico. *Repos. Inst. Univ. Cuenca* **2016**, 98.
- (65) Retto Hernández, P. I. Potencial Energético de La Producción de Bioetanol a Partir de Residuos Agroindustriales. **2019**, 70.
- (66) Rodríguez, E. C.; Fernández, V. L. Characterization of Agroindustrial Residues With a View To Its Exploitation. *Cent. Azúcar* **2016**, 43 (4), 27–35.
- (67) Moncada, O. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS, RAQUIS DE PALMA AFRICANA Y BAGAZO DE CAÑA, PARA VISUALIZAR SU POTENCIAL EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN. **2016**, 00226020 (3), 1–8.
- (68) Portocarrero, G. G. C. ADSORCIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN SOLUCIONES ACUOSAS UTILIZANDO LA PARED CELULAR DEL RAQUIS DE BANANO. **2019**.
- (69) Banderas, M.; Marcelo, D.; Torres, M.; Oswaldo, R. Aplicación de Biopolímero Basado En Raquis de Banano - Polietilenglicol Para Adsorción de Plomo y Cadmio. **2019**.
- (70) Tappi. Lignin in Wood and Pulp. *T222 Om-02* **2011**, 1–7.
- (71) Sluiter, A.; Hames, B.; Ruiz, R. O.; Scarlata, C.; Sluiter, J.; Templeton, D.; Energy, D. of. Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. *Biomass Anal. Technol. Team Lab. Anal. Proced.* **2004**, 2011 (April 2008), 1–14.
- (72) Wu, Y.; Zhang, S.; Guo, X.; Huang, H. Adsorption of Chromium(III) on Lignin. *Bioresour. Technol.* **2008**, 99 (16), 7709–7715.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.069>.
- (73) Albis, A. R.; Cajar R, L. V.; Domínguez, M. I. Análisis Cinético de La Adsorción de Cr (VI) En Soluciones Acuosa a Concentraciones de 10-20 Mg/L Con El Uso de Cáscara de Yuca Amarga (Manihot Esculenta). *Prospectiva* **2015**, 13 (2), 64.  
<https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.488>.
- (74) Duarte, E. QUITOSAN OBTENIDO DE DESECHOS DE CAMARON Studies of Chromium Removal from Tannery Wastewaters by Chitosan Biosorbents

Obtained Shrimp. *Sci. Tech.* **2009**, 2 (42), 290–295.

- (75) Lucia, M.; Villamizar, V.; Estella, L. U. Z.; La, M. D. E.; Bioadsorción, C. D. E.; Iii, D. E. C.; Naranja, C. D. E.; Pinzón-bedoya, M. L. Cr ( III ) USANDO CÁSCARA DE NARANJA KINETC MODELING BIOSORPTION OF Cr ( III ) USING. *Dyna* **2009**, 76 (Iii), 95–106.
- (76) Tejada-Tovar, C.; Villabona-Ortiz, Á. y; Marimón, W. Biosorción de Cromo ( VI ) En Aguas Usando Material Lignocelulósico Modificado. *Educ. en Ingeniería* **2014**, 9 (17), 86–97.
- (77) De, E.; Programa, P.; Doctorado, D.; Paola, Y.; Coila, A.; Optar, P.; Grado, E.; De, A. Universidad Nacional Del Altiplano. **2000**, 2006–2011.
- (78) Leyva, R.; Flores, J. V.; Díaz, P. E.; Berber, M. S. Adsorción de Cromo (VI) En Solución Acuosa Sobre Fibra de Carbón Activado. *Inf. Tecnol.* **2008**, 19 (5), 27–36. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3902it.07>.
- (79) Barrera, P. A. BIOSORCIÓN DE CROMO VI EN SOLUCIONES ACUOSAS CON CASCARILLA DE CACAO MODIFICADA CON ÁCIDO CÍTRICO. *Nhk 技研* **2018**, 151 (2), 10–17.
- (80) Disponible En: <Http://Www.Redalyc.Org/Articulo.Oa?Id=181620500026>. **2010**.

## ANEXOS

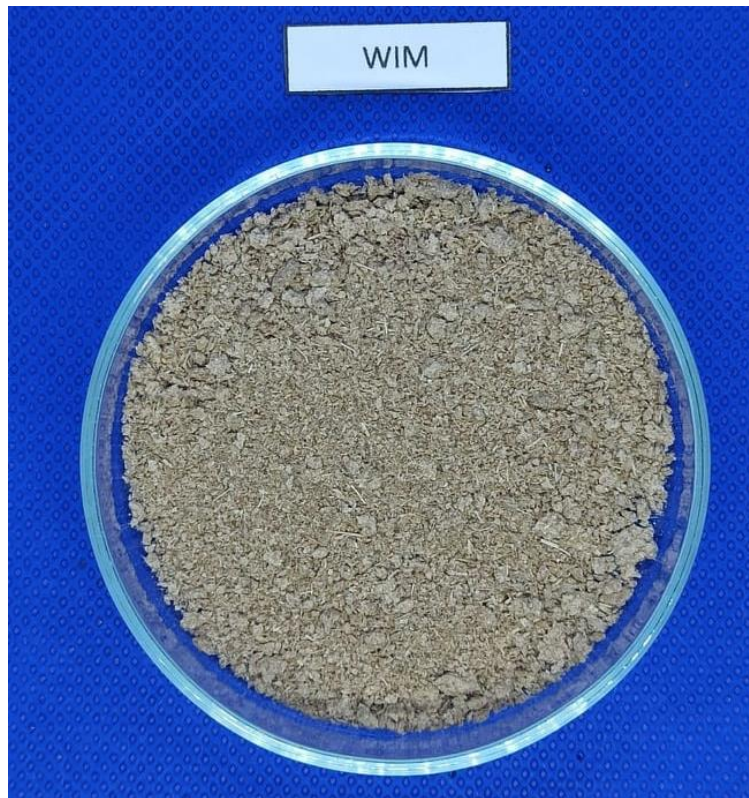
### Anexo 1. Troceado de raquis de banano



### Anexo 2. Material Insoluble en Etanol



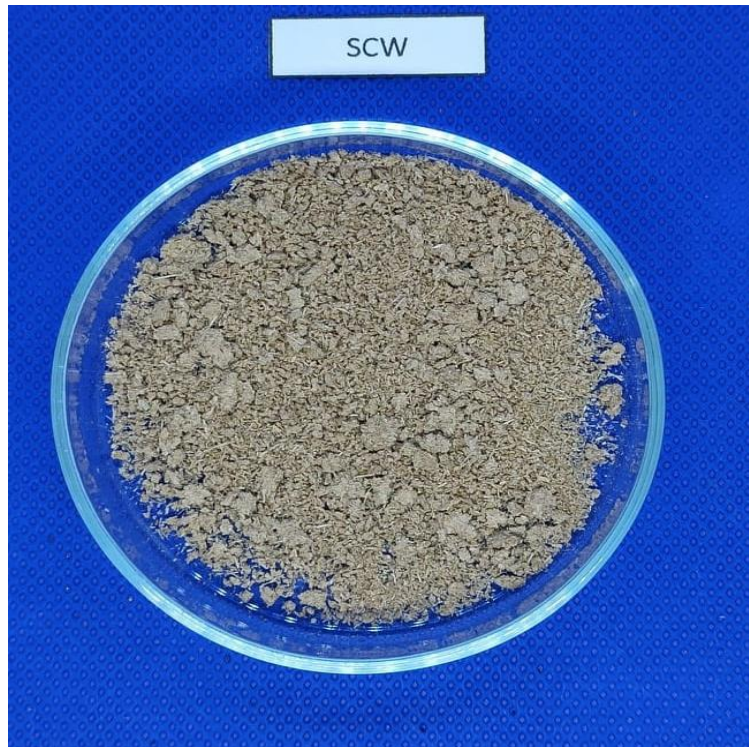
**Anexo 3. Material Insoluble en Agua**



**Anexo 4. Material Insoluble en Etanol-Agua**



**Anexo 5. Pared Celular Secundaria**



**Anexo 6. Celulosa**



## Anexo 7. Reactivos de aislamiento

