



*Universidad Autónoma del Estado de México*  

---

*Facultad de Planeación Urbana y Regional*



**“Remoción de Cd por *Musa cavendishii*, L.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:  
DIANA PEÑA MENDIETA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. EDUARDO CAMPOS MEDINA**

**CODIRECTORA:**

**DRA. PATRICIA BALDERAS HERNÁNDEZ**

**Agosto 2016**

Este trabajo de investigación se realizó con el financiamiento por parte de la **Universidad Autónoma del Estado México**, mediante el proyecto de investigación registrado ante la **Secretaría de Investigación de Estudios Avanzados** con número de registro **3552/2013C**

# Índice

	Página
Resumen.....	5
Introducción.....	7
Justificación.....	8
Hipótesis.....	10
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos.....	11
<b>CAPÍTULO I Marco teórico-conceptual</b>	
1.1 Contaminación de agua por iones metálicos.....	13
1.2 Tratamientos generales para iones metálicos.....	16
<b>CAPITULO II Marco referencial</b>	
2.1 Generalidades del Cadmio.....	26
2.2 Producción mundial y concentraciones de Cadmio.....	27
2.3 Usos del Cadmio.....	28
2.4 Problemática ambiental.....	30
<b>CAPITULO III Adsorción</b>	
3.1 Adsorción.....	34
3.2 Isotermas de adsorción.....	36
3.3 Tipos de adsorción.....	39
3.4 Adsorción como tratamiento para iones metálicos.....	41
<b>CAPITULO IV Metodología</b>	
4.1 Diagrama general.....	49
4.2 Desglose de actividades.....	49
4.2.1 Preparación de la cascara de plátano.....	49
4.2.1.1 Tratamiento físico.....	49
4.2.1.2 Tratamiento químico.....	50
4.2.2 Preparación de soluciones de Cadmio (II).....	50
4.2.3 Tiempo de contacto.....	51
4.2.4 Caracterización de <i>Musa cavendishii</i> , L. empleando Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	52
4.2.5 Resultados.....	53
4.2.5.1 Determinación de Cadmio por adsorción atómica.....	53
4.2.5.2 Determinación de remoción de Cadmio.....	53
4.2.5.3 Isotermas de adsorción.....	53

	Página
<b>CAPITULO V Resultados</b>	
5.1 Preparación de la cáscara de plátano.....	56
5.1.1 De forma natural.....	56
5.1.2 Tratamiento químico.....	56
5.2 Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	57
5.2.1 <i>Musa cavendishii</i> , L. natural.....	58
5.2.2 <i>Musa cavendishii</i> , L. tratado con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	60
5.3 Porcentajes de remoción de cadmio.....	61
5.4 Isotermas de adsorción.....	66
5.5 Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) después del contacto.....	72
 <b>CAPITULO V Conclusiones</b>	 76
 Bibliografía.....	 79

## Resumen

En este documento se presenta la investigación experimental, la problemática que aborda es la contaminación del agua Cadmio. Este elemento es altamente contaminante, ya que su presencia en el agua implica efectos dañinos a la salud del hombre, especies vegetales y animales.

Los tratamientos propuestos en la comunidad científica para removerlo de la fase acuosa han sido diversos, que van desde los más comunes que son el químico hasta lo más avanzados como son el electroquímico y separación por membranas.

En esta investigación se desarrolló la propuesta de remover el Cadmio por el proceso de adsorción empleando material orgánico de desecho que en este caso particular fue la cáscara de plátano cuyo nombre científico es la *Musa cavendishii*, L., este biomaterial fue recolectado de los residuos orgánicos generados en mercados. Por lo cual se aprovechó el gran volumen que se genera de este biomaterial como desecho.

Este biomaterial fue molido y tamizado hasta alcanzar un tamaño de partícula adecuado y establecido en investigaciones científicas que emplearon otros materiales también de naturaleza orgánica. La cáscara fue manejada de dos maneras, la primera de forma natural y la segunda mediante un tratamiento químico con ácido sulfúrico con la finalidad de oxidar su superficie.

A la par de esta manipulación del biomaterial, se prepararon soluciones sintéticas de Cadmio a diferentes concentraciones, con el propósito de poner en contacto ambos componentes. Esto se realizó con la finalidad de estudiar cual es el comportamiento del Cadmio con respecto al biomaterial, esto implica determinar si la biomasa del plátano retiene el contaminante en su superficie mediante el proceso de adsorción.

Para alcanzar esta meta fue necesario realizar varios experimentos los cuales se condujeron a diferentes tiempos, enfatizando que éstos se llevaron a cabo utilizando los dos tipos de biomaterial. Esto generó varios resultados los cuales fueron analizados y mediante este análisis se calcularon varias gráficas experimentales relacionadas con términos tales como: porcentajes de remoción e isothermas de adsorción los cuales permitieron dilucidar qué es lo que sucedió en el proceso de adsorción del Cadmio ya mencionado anteriormente.

Cabe señalar que en este trabajo la generación de los resultados se realizó por triplicado y en este documento se reportaron los promedios finales de dichos cálculos. Asimismo se emplearon varios equipos que ayudaron a explicar que fue lo que sucedió en el proceso de adsorción, entre estos se mencionan al equipo de absorción atómica y microscopio electrónico de barrido. Estos equipos fueron facilitados por varias instituciones como fueron el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) y el Centro Conjunto de Investigación de Química Sustentable (CCIQS) de la UAEM-UNAM.

Los resultados mostraron que efectivamente el Cadmio es removido de la fase acuosa, por medio de la adsorción empleando los biomateriales señalados previamente, pero los mejores porcentajes obtenidos fueron para la biomasa que fue tratada químicamente, esto anterior se puede consultar en el capítulo correspondiente a los resultados.

## Introducción

La creciente demanda de agua para consumo ha propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento del agua contaminada de diversos orígenes.

En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta fundamentalmente la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de los efluentes a tratar. Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales.

Sin embargo, en algunos casos estos procesos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por la normatividad vigente o para el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos y cada vez más, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas tecnologías alternativas, muy poco aplicados y, peor aún, no conocidos en los países de América Latina. Estos métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales.

Las tecnologías alternativas tales como la adsorción con biomateriales se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios en la concentración y/o estado de oxidación de los contaminantes, que usualmente son iones metálicos. Estas tecnologías son de naturaleza y funcionalidad excelente ya que pueden aplicarse como pretratamientos o postratamientos, de ahí que se propongan dichas tecnologías en este trabajo de investigación, tanto para dar difusión, como para proponerlas como técnicas alternativas a las plantas tratadoras que existen en México.

## Justificación

La contaminación del agua por metales pesados tóxicos es un gran problema ambiental alrededor del mundo. El Cadmio, Mercurio, Plomo, Cromo y Arsénico constituyen un grupo serio de peligrosos metales pesados y los cuales son de gran interés para los ambientalistas. Ya que todos ellos tienen efectos adversos sobre el entorno.

De manera específica se menciona al Cadmio, ya que los mayores generadores de este elemento son las industrias dedicadas a la electroplastia, esmaltado, manufactura de aleaciones metálicas, pigmentos, plásticos y baterías. El Cadmio rápidamente se acumula en sistemas vivos, teniendo efectos adversos sobre la salud, causando desordenes renales, insuficiencias pulmonares, lesiones óseas, cáncer e hipertensión en el hombre.

Las primeras investigaciones dedicadas a la remoción de Cadmio se enfocaron al uso de agentes químicos, los cuales provocan una precipitación química, así también se estudiaron los métodos de intercambio iónico, filtración, tecnologías de membrana y otros. En los últimos años se explorado el método de adsorción química empleando diversos biomateriales, los cuales atrapan al Cadmio para removerlo del agua residual.

Por otro lado se ha empezado a estudiar la adsorción de estos contaminantes empleando seres vivos como son los lirios acuáticos, las bacterias y las algas. De ahí que en este trabajo de investigación se proponga estudiar la remoción de este contaminante por *Musa cavendeshii*, L.

En el Estado de México y de manera específica en el Valle de Toluca, se tiene localizado un parque industrial, el cual tiene varias empresas que tiene su actividad orientada al giro metal-mecánico, por lo cual sus aguas residuales contienen Cadmio disuelto



Esta problemática ha sido detectada en el pasado inmediato, por lo cual se han desarrollado varias propuestas de solución, pero desgraciadamente la mayoría de ellas no presentaron un cien por ciento de eficiencia en la remoción del Cadmio, por lo cual esta propuesta de investigación plantea que este tratamiento sea a manera final por así decirlo un método de pulimiento ya sea de manera insitu en los procesos de dichas empresas o por medio de la planta tratadora de aguas que también se ubica cerca de este parque industrial.

## **Hipótesis**

Mediante el uso del biomaterial *Musa cavendishii*, L. en un proceso de adsorción, se alcanzaran altos porcentajes de remoción del Cadmio disuelto en fase acuosa.

En soluciones que contienen disuelto al Cadmio, provocara que la concentración de este elemento disminuya debido a una adsorción en función del tiempo.

## Objetivos

### Objetivo General

Analizar y establecer el grado de remoción del Cadmio presente en soluciones sintéticas acuosas, mediante una adsorción, empleando el biomaterial *Musa cavendishii*, L.

### Objetivos Específicos

- Preparar soluciones sintéticas a diferentes concentraciones de Cadmio, las cuales serán empleadas en el estudio de adsorción.
- Establecer las variaciones de concentración del Cadmio en las soluciones sintéticas.
- Emplear de dos maneras el biomaterial *Musa cavendishii*, L., es decir de manera natural y con tratamiento químico, para realizar el proceso de adsorción con las soluciones sintéticas de Cadmio.
- Realizar los contactos entre los dos tipos de biomateriales y las soluciones sintéticas a fin de que se lleve a cabo la remoción del Cadmio de la solución acuosa.
- Cuantificar la concentración del Cadmio después de los contactos en fase acuosa a fin de establecer el grado de remoción de este analito.
- Establecer el comportamiento de la adsorción que se lleva a cabo entre el Cadmio y el biomaterial empleado en la experimentación.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEORICO CONCEPTUAL**

### **1.1.- Contaminación de agua por iones metálicos.**

La contaminación del agua se define como la incorporación de materias extrañas como; microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos. (Campos *et al.*, 2011)

Esta modificación de la calidad agua es generalmente provocada por el hombre, haciéndola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como para la vida natural. (Carta del agua, consejo de Europa 1968)

Dicha contaminación del agua causada por metales pesados se ha convertido en un serio problema, los metales pesados no son biodegradables en el medio ambiente y pueden ser perjudiciales para una variedad de especies vivas, y también pueden ser acumulados a lo largo de las cadenas de comida que finalmente son un problema para los seres humanos, especialmente los elementos no esenciales, tales como el Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) que están a menudo presentes en las aguas residuales industriales, los cuales se consideran metales pesados de alta toxicidad. (Haung y Zh-Min Liu, 2013)

La toxicidad de las fuentes de agua debido a la descarga de efluentes industriales, es un problema ambiental mundial. Las aguas residuales industriales a menudo contienen una considerable cantidad de iones de metales pesados y contaminantes orgánicos, que pudieran poner en peligro a la salud pública y el medio ambiente. (Mahendra Kumar *et al.*, 2009)

Los metales poseen tiempos de vida infinitos, no se biodegradan fácilmente y los métodos químicos o biológicos para su tratamiento presentan severas restricciones o son prohibitivos por su alto costo. (Litter 2014)

La amenaza de contaminación por metales pesados recibe amplia atención por parte de los ambientalistas que han estado desarrollando muchos métodos para eliminar o neutralizar sus efectos tóxicos en aguas residuales industriales.

En muchas regiones del mundo, la contaminación por metales pesados es resultado de la liberación antropogénica de trazas metálicas, que ha generado problemas de salud pública debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente (Robinson-Lora y Brennan, 2009), así como al contacto directo que el hombre tiene con los distintos productos elaborados potencialmente con microestructuras metálicas tales como; sensores, microchips, tecnologías médicas (Himendra et al., 2010). En las variadas fuentes de contaminación, se incluyen los procesos de manufactura, actividades metalmeccánica, refinación, fertilización agrícola, tratamiento de aguas residuales, entre otras (Schneegurt, *et al.*, 2001).

En un futuro no se podrá abastecer de agua potable natural a la humanidad, si se continúan con las emisiones de residuos industriales contaminan al medio ambiente. Por lo tanto, si en última instancia se tiene que utilizar el agua residual tratada para nuestras necesidades básicas, se tendrá que mejorar y optimizar los tratamientos de las mismas, además de buscar nuevas tecnologías que sean más económicas y eficientes, que puedan solucionar las demandas de agua potable. (Contreras, *et al.*, 2013)

Las normas oficiales mexicanas contra la contaminación ambiental (publicadas en el Diario Oficial del 18 de Octubre de 1993) consideran metales contaminantes del agua (en orden de importancia por su abundancia) al: Aluminio, Plata, Cadmio, Arsénico, Cobre, Hierro, Mercurio, Cobalto, Vanadio, Manganeso, Níquel, Zinc, Magnesio, Antimonio, Cromo, Selenio, Titanio, Berilio, Estaño, Boro, Molibdeno, Tungsteno, Germanio, Bismuto, Plomo y Telurio.

La contaminación del agua por Cadmio es provocada por las principales áreas de aplicación que arrojan sus desechos a las alcantarillas, como son el acabado de metales, la electrónica, la manufactura de pigmentos (pinturas y agentes colorantes), de baterías (Cadmio y Níquel), de estabilizadores plásticos, de plaguicidas (fungicidas), la electrodeposición o la aleaciones de fierro, en la

producción de Hierro y Zinc, y en el uso de reactores nucleares. (Arup y Bhattacharya, 2013)

Los alquil y aril Cadmios se usan como catalizadores y sus sales de los ácidos orgánicos (Laurato, Estearato, Palmitato, Fenolato, Naftenato y Benzoato de Cadmio) como estabilizadores térmicos y de luz en los plásticos como el Cloruro de Polivinilo. El uso de estabilizadores de bario-cadmio en plásticos contaminan los alimentos almacenados en ellos.

Sin embargo, parte del Cadmio atmosférico acaba siendo depositado en la superficie del agua, y representa el 23% del Cadmio contaminante que llega al agua, es decir, es la vía principal de entrada de cadmio en agua.

El 3 de diciembre del 1997 la Comisión Europea establece los valores límite de emisiones mensuales permitidos por la industria, garantizando también la no transferencia de contaminación del aire al agua, los valores permitidos en agua para compuestos de Cadmio serán 0.02 mg/L (promedio mensual).

([www.agua.org.mx](http://www.agua.org.mx), 2012)

De acuerdo a la definición que da la OMS para la contaminación debe considerarse también, tanto las modificaciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, que pueden hacer perder a ésta su potabilidad para el consumo diario o su utilización para actividades domésticas, industriales, agrícolas, etc.,

La OMS ha establecido, también, los límites máximos para la presencia de sustancias tóxicas en el agua de consumo humano, menciona que para el caso del Cadmio la concentración máxima permisible es de 0.01 mg/L. Una forma opcional de nombrar a los metales pesados es “elementos tóxicos”, los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes elementos:

Arsénico, Cromo, Cobalto, Níquel, Cobre, Zinc, Plata, Cadmio, Mercurio, Titanio, Selenio y Plomo. (<http://www.ine.gob.mx> 2012)

Los métodos más ampliamente utilizados son precipitación química, ósmosis inversa, evaporación, filtración con membrana inversa, el tratamiento biológico de adsorción, intercambio iónico, extracción de líquido, operación electroquímica, la flotación, electrodiálisis y adsorción. (Arup y Bhattacharya, 2013)

En este trabajo se pone énfasis en la problemática del Cadmio, ya que éste no existe libre en la naturaleza. Se usa en galvanoplastia, aleaciones, pinturas, insecticidas, baterías y como absorbedor de neutrones en reactores nucleares. Es muy tóxico y puede entrar al cuerpo humano a través de alimentos contaminados con residuos de fertilizantes. El nivel recomendado en agua potable se sitúa por debajo de 5 ppb según la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, y está incluido en la lista de contaminantes prioritarios de la US EPA, junto con el Plomo y el Talio, su presencia en suelos y sedimentos aumenta la posible contaminación de aguas.

### ***1.2.- Tratamientos generales para iones metálicos***

Los iones metálicos presentes en el agua presentan diferentes características por lo que la eliminación de estos iones requiere de un procedimiento específico, los procesos generales más importantes para la eliminación de los iones metálicos son:

#### ***A) Oxidación-Reducción***

Consiste en hacer reaccionar los contaminantes con reactivos que provoquen la pérdida de electrones (oxidación) o la ganancia de electrones (reducción) de los contaminantes.



En general la oxidación es un proceso químico de tratamiento de flujos residuales industriales, por el cual, mediante una reacción entre reactivo y contaminante, se produce una “transferencia electrónica”, que origina un cambio sustancial; así un elemento peligroso en un flujo residual, es transformado en un elemento no peligroso. (<http://www.medioambiente.mx>, 2014)

El tratamiento de flujos residuales industriales mediante el proceso de reducción es de igual manera una transferencia de electrones entre un contaminante químico en su forma oxidada que consigue ser reducido por un agente reductor, cuando ambos están en contacto

(<http://www.medioambiente.mx>, 2014)

Puede ocurrir una oxidación incompleta o formación de compuestos intermedios, dependiendo del contaminante y el agente oxidante usado; la presencia de aceites y grasas disminuye la eficiencia; los costos se incrementan para altas concentraciones de contaminantes. Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología de corto a mediano plazo, cuyos costos oscilan entre 190 y 600 USD/m<sup>3</sup>. (Van Deuren y col., 1997).

### *B) Precipitación Química*

Por precipitación química se entiende la formación, por acción de los reactivos apropiados, de compuestos insolubles de aquellos elementos contaminantes que, interviniendo en la composición de un flujo residual líquido, se pretende eliminar del mismo.

Para la eliminación de metales pesados se realiza mediante la formación de los correspondientes hidróxidos, entre los metales pesados a los que es factible su aplicación se encuentran, el Arsénico, Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Mercurio, Níquel y Zinc.

La adición de agentes precipitantes como los carbonatos y los sulfuros son los más eficaces para provocar la precipitación de los metales pesados, incluso en presencia de agentes quelantes, aunque presenta el inconveniente de que un exceso en su aplicación puede haber un desprendimiento de Sulfuro de Hidrógeno, el cual es un gas tóxico.

(<http://www.medioambiente.mx> 2014)

Este tratamiento se consigue, mediante la adición de reactivos, que contaminantes solubles se transformen en formas insolubles o de menor solubilidad.

La precipitación química es uno de los procesos comúnmente empleados y convencionales para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales. La precipitación se utiliza ampliamente debido a su naturaleza sencilla y barata, metales pesados bivalentes, tales como Cu (II), Cd (II), Mn (II), Zn (II) pueden ser removidos mejor por esta técnica. (<https://upcommons.upc.edu>. 2014)

En presencia de niveles elevados de carbonato, la precipitación puede darse en forma de carbonato de cadmio. Ésta es más efectiva que la precipitación del hidróxido debido a que la solubilidad del carbonato de cadmio es mucho menor y tiene una gran capacidad de sedimentación, Si el medio está libre de cianuro, la precipitación de carbonato de cadmio mejora significativamente y se da a pH próximos al neutro.

La coprecipitación con Hidróxido de Hierro o de Aluminio son tratamientos que mejoran la eliminación del Cadmio; estos Hidróxidos actúan como agentes coagulantes y mejoran la capacidad de sedimentación. Por ello, son especialmente útiles cuando el efluente tratado contiene otros metales además del Cadmio, ya que precipitan varios metales conjuntamente.

La presencia de agentes complejantes como el Cianuro dificulta la precipitación del Cadmio por lo que deben antes tratar el efluente contaminado para que el tratamiento sea efectivo. (<https://upcommons.upc.edu>. 2014)

Algunas desventajas de este método son, la presencia de agentes orgánicos disminuye su rendimiento, no es selectivo, se necesitan agentes coagulantes y floculantes para separar los metales del efluente y la Generación de lodos tienen un alto costo de tratamiento. (Reyes *et al.*, 2006.)

En el presente trabajo de investigación se centra en el Cadmio por lo que cabe mencionar que la precipitación química es un método importante ya que los compuestos de Cadmio son precipitados insolubles y altamente estables a pH básicos. La precipitación de Hidróxido suele hacerse a pH entre 8 y 11, aunque el tratamiento es más efectivo a pH superior a 10, consiguiéndose una eliminación superior al 99,9%.

### *C) Filtración*

Se fundamenta en la retención de sólidos provocada por la interposición de un medio poroso. Los sólidos quedan retenidos en la superficie o en el interior del medio poroso. Como medios porosos se utilizan materiales como arenas, carbón activo, vidrio, o membranas sintéticas.

Consiste en pasar el agua a través de un medio poroso con el objeto de retener los sólidos en el medio y permitir que el agua libre de sólidos continúe su camino. Se distinguen dos grupos de medios filtrantes: las membranas y los medios porosos (Winker, 1989).

El medio filtrante comúnmente incluye arena, carbón, tierras de diamoteas y carbón activado en polvo o granulado, pero el más utilizado es la arena sílice.

Debido a la diversidad de estos materiales, el mecanismo involucrado para la eliminación del material en suspensión es muy complejo (Campos, 2008).

#### *D) Floculación*

El proceso de floculación consiste en la aglomeración de partículas coloidales suspendidas por medio de un mezclado físico y con ayuda de un coagulante químico, para formar flóculos de mayor tamaño capaces de ser separados por procesos subsecuentes como sedimentación o filtración. (Muhammad Bilal *et al.*, 2013)

La floculación se basa en la colisión y aglomeración de las partículas presentes en el líquido, sean éstas de origen natural o como un producto de precipitación química o ya sea por coagulación. La rapidez y el grado de agregación de las partículas dependen del número y tamaño de éstas, de la rapidez del choque, de la capacidad de la partícula para adherirse a otra, del tiempo y grado de mezclado (Campos, 2009).

Este método se puede resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flóculos, de tal manera que su peso específico supere al del agua y se puedan precipitar. (Barrera Díaz, 2014)

Los tipos de floculantes según su naturaleza, pueden ser:

- **Minerales:** por ejemplo la sílice activada. Se le ha considerado como el mejor floculante capaz de asociarse a las sales de Aluminio. Se utiliza sobre todo en el tratamiento de agua potable.
  - **Orgánicos:** son macromoléculas de cadena larga y alto peso molecular, de origen natural o sintético.
- (<http://ingenieria-de-aguas-residuales.com> 2014)

## E) Coagulación

Consiste en añadir compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas de tensión que apartan a los sólidos suspendidos entre sí, o puede definirse como el tratamiento especial para la eliminación de sólidos suspendidos (orgánicos, inorgánicos o biológicos) finamente divididos o que no pueden ser retenidos por filtros de arena (Rebhun *et al.*, 1998).

En otras palabras consiste en la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. (<http://www.uclm.es> 2014)

Las principales sustancias con propiedades coagulantes utilizadas en el tratamiento de aguas son:

- Sulfato de Aluminio
- Cloruro Férrico
- Sulfato Ferroso y Férrico
- Clorosulfato Férrico

(Barrera Díaz, 2014)

La coagulación se puede presentar a un potencial pequeño sin necesidad de neutralizarlo por completo. Si se añade demasiado coagulante las partículas se cargan ahora con el signo contrario y pueden volver a dispersarse.

Para complementar la adición del coagulante se requiere del mezclado para destruir la estabilidad del sistema coloidal. Para que las partículas se aglomeren deben chocar, y el mezclado promueve la colisión. El movimiento browniano, movimiento caótico comunicado a las partículas pequeñas al ser bombardeadas por moléculas individuales de agua, está siempre presente como una fuerza homogeneizadora natural. Sin embargo, casi siempre es necesaria energía

adicional de mezclado. Un mezclado de gran intensidad que distribuya al coagulante y promueva colisiones rápidas es lo más efectivo.

También son importantes en la coagulación la frecuencia y el número de colisiones entre las partículas. Así, en aguas de baja turbidez, puede requerirse la adición de sólidos para aumentar dichas colisiones. (<http://www.uclm.es> 2014)

Principalmente la coagulación implica tres etapas

- Adición de coagulante
- Desestabilización de la partícula coloidal y formación de flóculos
- Sedimentación de flóculos

(Barrera Díaz, 2014)

#### *F) Tratamientos especiales*

Un tratamiento especial es el intercambio iónico el cual consiste en poner en contacto un líquido con un sólido que presente facilidad para intercambiar iones. Normalmente estos sólidos son resinas de intercambio iónico.

El intercambio iónico es otro método de tratamiento importante y prometedor que quita o recupera los iones de metales preciosos del agua residual. (Muhammad Bilal et al., 2013)

Dentro del proceso de intercambio iónico se involucra una reacción química, en la que un ión de la solución es intercambiado por otro similarmente cargado y unido a una partícula sólida móvil (Perry, 2001). Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante. (Rodríguez et. al., 2006). Las resinas de intercambio catiónico son aquellas que tienen un ión de intercambio móvil cargado

positivamente, mientras que los aniones de intercambio son aquellos que sus iones intercambiables están cargados negativamente.

Mediante el uso de una combinación de resinas de intercambio aniónico y catiónico, virtualmente todos los contaminantes pueden ser removidos de una solución. La reacción de intercambio iónico es reversible, es decir, puede avanzar en los dos sentidos y puede llevarse a cabo por lotes o columna (Sánchez, 2004).

Específicamente para el Cadmio se trata de un mecanismo de interacción electrostática, debido a las fuerzas de atracción de Coulomb que tienen lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Cuando las concentraciones de metal en los efluentes son bajas, el uso de membranas o la recuperación con disolvente pierden sus ventajas y no son efectivos.

El intercambio iónico se utiliza como un tratamiento secundario, ya sea para eliminar los restos de Cadmio o para recuperarlos. Con este tratamiento, los metales contaminantes quedan retenidos en la resina y se liberan los cationes a la resina. (<https://upcommons.upc.edu>. 2014)

Algunas desventajas para este método son: la presencia de Calcio, Sodio y magnesio disminuye su rendimiento debido a que puede saturar la resina, la posible competencia entre metales pesados y otros cationes, las resinas no son muy tolerantes al cambio de pH, los materiales orgánicos pueden envenenar la resina y por último la solución contaminada debe ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión. (Reyes et al., 2006.)

Otro tratamiento es el de adsorción que por medio de la fijación (física o química) sobre un sólido el contaminante se retira de una solución. Como medios de adsorción se emplean, entre otros, carbón activo y zeolitas.

La adsorción es un método reconocido para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales que tiene una baja concentración de metales pesados. El proceso de adsorción ofrece flexibilidad en el diseño y operación, y en muchos casos producir alta calidad de efluente tratado.

algunas de las desventajas más notorias de la adsorción son: el costo del adsorbente y su regeneración pueden ser muy altos, la capacidad de adsorción es altamente dependiente del pH y por último es necesario eliminar los materiales en suspensión antes de que el efluente sea tratado. (Reyes et al., 2006.)

Además de esto, la adsorción es reversible y los adsorbentes se pueden regenerar mediante técnicas de desorción. Muchos adsorbentes de bajo coste se han desarrollado y probado para la eliminación de iones de metales pesados, hasta ahora reflejan diferentes eficiencias de adsorción, dependiendo del tipo de adsorbentes utilizados. (Muhammad Bilal et al., 2013) Este tema se tocará de manera más específica en el capítulo III.



**CAPITULO II**  

---

**MARCO REFERENCIAL**

## 2.1.- Generalidades del Cadmio

El cadmio (Cd) es un metal pesado poco abundante en la corteza terrestre, es un elemento del grupo 12 de la tabla periódica con número atómico de 48, valencia 2, su estado de oxidación es de +2, su masa atómica es de 112.4 g/mol, su densidad es de 8.65 g/mL y es divalente en todos sus compuestos estables (Choong *et al.*, 2014, Yalçinkaya *et al.*, 2002)

El Cadmio no se encuentra en estado libre en la naturaleza, y la greenockita (Sulfuro de Cadmio), único mineral de Cadmio, no es una fuente comercial de metal. Casi todo el que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de Zinc, los cuales por lo general contienen de 0.2 a 0.4%. Estados Unidos, Canadá, México, Australia, Bélgica, Luxemburgo y República de Corea son fuentes importantes, aunque no todos son productores. Tanto el cadmio como sus compuestos son muy tóxicos. Los fallos en la apreciación de las propiedades tóxicas del Cadmio pueden producir que los trabajadores estén expuestos sin saberlo a vapores peligrosos.

(<https://www.uam.es> 2014)

La toxicidad por Cadmio ocurre cuando una persona aspira niveles elevados de cadmio en el aire o come alimentos o bebe agua que contienen niveles elevados de Cadmio. El Cadmio es un metal natural que suele encontrarse en el ambiente como un mineral combinado con otros elementos (Oxígeno, Cloro, Sulfuro). La exposición al Cadmio, tanto a corto como a largo plazo, puede provocar problemas de salud graves.

Cualquier persona puede padecer toxicidad por Cadmio como resultado de la exposición a éste. Al aspirar Cadmio puede provocar daño en el pulmón, enfermedad renal, fragilidad en los huesos e incluso la muerte. (Krisha McCoy 2010)

## **2.2.- Producción mundial y concentraciones de Cadmio**

La producción mundial del Cadmio es de más de 20 mil toneladas/año. El Cadmio es muy resistente a la corrosión y se utiliza para su electrodeposición galvánica en otros metales, especialmente el acero y el hierro. Además, por su inalterabilidad al calentamiento, el Cadmio amarillo se emplea sobre todo en la industria del plástico como en la pintura, entre otros.

Debido a su elevada dispersión ambiental el cadmio se encuentra en el aire, en el suelo, y en el agua, y como todos los metales pesados causa un impacto ambiental que modifica los parámetros de calidad de agua. (Meddedu, 2005).

Las concentraciones de Cadmio en aguas marinas no contaminadas son de 0.04/0.3 mg por litro, en las aguas inferiores a 1 mg/l, en el suelo son menos de 1 mg/l, mientras que alrededor de zonas industriales pueden alcanzar niveles elevados de 60-70 mg/l, siendo sus fuentes de emisión principales los vertederos industriales, las centrales a carbón y los incineradores. (L., 1974)

Específicamente para America Latina y el Caribe la producción de Cadmio en el 2008 fue de 19 600 TM en refineries, los cuales Latinoamérica contribuyó con el 11 %; México con 1605 TM, Peru con 371 TM, republica de Corea con 2900 TM y Japon con 2116 TM. (Grupo GEA, 2010)

En las zonas rurales no contaminadas la concentración media anual de Cadmio en el aire es de 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que cerca de las zonas industriales la concentración media semanal en el aire supera con facilidad los 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , (Ikeda M., 2000) cabe mencionar que este dato es relevante ya que parte de la contaminación por Cadmio en la atmosfera pasa directamente al suelo o al agua por lo que posteriormente se presentan concentraciones altas de este metal en el agua.

### 2.3.- Usos del Cadmio

Existe una diversidad de usos del Cadmio, por lo que solo se mencionan los más importantes; el Cadmio se deposita electrolíticamente sobre metales, principalmente hierro o el acero, sobre los que forma un revestimiento químicamente resistente, Se alea con el cobre para los cables del tendido eléctrico, rebaja el punto de fusión de los metales con los que se alea; se usa con Pb, Sn y Bi en la fabricación de fusibles para sistemas automáticos, alarmas contra incendios y fusibles eléctricos, una aleación de Cadmio con Pb y Zn se usa como soldadura para el hierro, se usa también para las barras de control en plantas eléctricas nucleares por su capacidad de absorción de neutrones lentos y como blindaje contra neutrones en aparatos de medida, las sales de Cadmio se usan en fotografía y en la fabricación de fuegos de artificio, pinturas fluorescentes, vidrios y porcelana y El sulfato de Cadmio ( $\text{CdSO}_4$ ) se usa en medicina como astringente. El Sulfuro de Cadmio ( $\text{CdS}$ ) y Seleniuro de Cadmio ( $\text{CdSe}$ ) se utilizan como pigmento. (<http://www.kodak.com> 2014)

El Cadmio se utiliza en el chapado metálico de aplicaciones de alta tensión, en ciertos filtros de vidrio, en la fabricación de pigmentos y plásticos y como catalizador químico. El Cadmio también se puede utilizar en tintas de película gruesa de placas de circuitos, en relés eléctricos e interruptores, en foto detectores y detectores de enfoque automático y en baterías.

Una parte importante se emplea en galvanoplastia (como recubrimiento). Algunas sales se emplean como pigmentos. Por ejemplo, el Sulfuro de Cadmio se emplea como pigmento amarillo. Se emplea en algunas aleaciones de bajo punto de fusión. Debido a su bajo coeficiente de fricción y muy buena resistencia a la fatiga, se emplea en aleaciones para cojinetes. Muchos tipos de soldaduras contienen este metal. En barras de control en fisión nuclear. Algunos compuestos fosforescentes de Cadmio se emplean en televisores. Se emplea en algunos semiconductores. Algunos compuestos de Cadmio se emplean como estabilizantes de plásticos como el PVC. (<https://camimex.org.mx> 2014)

El Cadmio también se usa y se comercializa en todo el mundo, como metal y como componente de diferentes productos y desechos. En todo el mundo se producen y consumen Cadmio, compuestos de Cadmio y productos que contienen Cadmio. En todo el mundo se extraen concentrados que contienen Cadmio, principalmente como un subproducto de la producción de zinc. La localización de la producción primaria de Cadmio cambió entre 1995 y 2005; la producción en Asia aumentó marcadamente al mismo tiempo que descendía la producción en Europa. En general, la producción primaria mundial de Cadmio estaría disminuyendo, mientras que la producción secundaria (principalmente relacionada con la producción de Zinc) estaría aumentando. (Mineral Commodity Summaries, 2008)

La tendencia mundial en las últimas dos décadas ha sido un pronunciado aumento del uso del Cadmio para baterías y una disminución en el uso para casi todas las demás aplicaciones. Las baterías de Níquel-Cadmio constituyeron el 82 por ciento del consumo mundial en 2005. La producción de estas baterías es un proceso en cadena internacional: los materiales en bruto provienen de un país, las baterías se fabrican en otro; las baterías se incorporan a productos en otro país y los consumidores compran y usan los productos en un país diferente. (International Cadmium Association, 2006)

## 2.4.- Problemática ambiental

Uno de los mayores agentes tóxicos asociados a contaminación ambiental e industrial es el Cadmio, pues reúne cuatro de las características más temidas de un tóxico:

1. Efectos adversos para el hombre y el medio ambiente.
2. Bioacumulación.
3. Persistencia en el medio ambiente.
4. Viaja a grandes distancias con el viento y en los cursos de agua.

Un problema ambiental serio ocasionado por el Cadmio es la acumulación de las pilas desechadas en la basura ya que estas en contacto con la tierra y la humedad, liberan sus componentes químicos que se acumulan en el suelo contaminándolo. Análisis químicos han mostrado que éstas son las responsables del 93% de Mercurio, del 47% de Zinc, del 48% de Cadmio y del 22% de Níquel presente en la basura doméstica.

La acumulación de las pilas se debe a que durante las tres últimas décadas se ha notado un incremento en los países desarrollados y subdesarrollados de todo el planeta, lo que ha acrecentado el uso de las pilas y baterías. En la Ciudad de México se calcula que cada habitante consume anualmente un promedio de seis pilas lo que corresponde a un aproximado de 51 millones anuales, que a su vez equivalen a 1275 toneladas, las que al ser desechadas a la basura se oxidan y desintegran, dejando libres los componentes tóxicos que forman parte de su composición química de los cuales, el 30% corresponden al dióxido de Manganeso, Cadmio, Níquel y Mercurio contaminando al suelo y agua. Elementos que se han descritos como altamente mutagénicos y carcinogénicos y que una vez disueltos en el medio son captados por los seres vivos, en primera instancia, por las plantas a través del agua (que requieren para efectuar la fotosíntesis) y en segundo término por los humano, cuando estos contaminan los mantos freáticos. Por otra parte, en relación a su toxicidad ambiental, la Secretaria del Medio Ambiente a través de su titular informó que el 40% de éstas entran al mercado

mexicano de manera ilegal y que además presentan un porcentaje mayor de los elementos tóxicos mencionados. (<http://biologia.dgenp.unam.mx> 2011)

Las aguas residuales con Cadmio procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son por ejemplo la producción de Zinc, minerales de Fosfato y las bioindustrias del estiércol. El Cadmio de las corrientes residuales puede también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles. Debido a las regulaciones sólo una pequeña cantidad de Cadmio entra ahora en el agua a través del vertido de aguas residuales de casas o industrias. (Choong *et al.*, 2014; Rao K.S. *et al.*, 2010)

Otra fuente importante de emisión de Cadmio es la producción de fertilizantes fosfatados artificiales. Parte del Cadmio terminará en el suelo después de que el fertilizante es aplicado en las granjas y el resto del Cadmio terminará en las aguas superficiales cuando los residuos del fertilizante son vertidos por las compañías productoras.

El Cadmio puede ser transportado a grandes distancias cuando es absorbido por el lodo. Este lodo rico en Cadmio puede contaminar las aguas superficiales y los suelos.

El Cadmio es fuertemente adsorbido por la materia orgánica del suelo. Cuando el Cadmio está presente en el suelo este puede ser extremadamente peligroso, y la toma a través de la comida puede incrementar. Los suelos que son ácidos aumentan la toma de Cadmio por las plantas. Esto es un daño potencial para los animales que dependen de las plantas para sobrevivir. El Cadmio puede acumularse en sus cuerpos, especialmente cuando estos comen muchas plantas diferentes. Las vacas pueden tener grandes cantidades de Cadmio en sus riñones debido a esto. (Ramos *et al.*, 2004).

Las lombrices y otros animales esenciales para el suelo son extremadamente sensibles al envenenamiento por Cadmio. Pueden morir a muy bajas concentraciones y esto tiene consecuencias en la estructura del suelo. Cuando las concentraciones de Cadmio en el suelo son altas esto puede influir en los procesos del suelo de microorganismos y amenazar a todo el ecosistema del suelo.

En ecosistemas acuáticos el Cadmio puede bioacumularse en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces. La susceptibilidad al Cadmio pueden variar ampliamente entre organismos acuáticos. Organismos de agua salada se sabe que son más resistentes al envenenamiento por Cadmio que organismos de agua dulce. Animales que comen o beben Cadmio algunas veces tienen la presión sanguínea alta, daños del hígado y daños en nervios y el cerebro.

Una actividad que resulta de igual manera perjudicial para el agua es la minería de metales no ferrosos ya que es una fuente de liberación de Cadmio al medio acuático, la contaminación puede provenir del agua de drenado de minas, de las aguas residuales del procesamiento de los minerales, de derrames de los depósitos de desechos del proceso mineral, entre otros. (Osorio, *et al.*, 2007)



**CAPITULO III**  

---

**ADSORCION**

### **3.1.- Adsorción**

Castellan, 1987; Maron y Prutton 1977, definen adsorción como un proceso mediante el cual se concentra una sustancia sobre la superficie de otra fase sólida o líquida. Por lo cual es considerado un fenómeno superficial. La sustancia que se concentra en la superficie recibe el nombre de adsorbato y la fase que la retiene es llamada adsorbente. (Campos 2012)

Por el contrario, la absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una "solución" con esta segunda.

El término adsorción incluye la adsorción y la absorción conjuntamente, siendo una expresión general para un proceso en el cual un componente se mueve desde una fase para acumularse en otra, principalmente en los casos en que la segunda fase es sólida. (Appelo and Postma, 1993)

La adsorción es un fenómeno muy general, sin embargo solo ciertos sólidos exhiben suficiente especificidad y capacidad de adsorción, para ser útiles como adsorbentes industriales, puesto que los sólidos poseen frecuentemente una capacidad muy específica de adsorber grandes cantidades de ciertas sustancias (Sánchez, 2004).

La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refinamiento, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamientos más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico. (Rodríguez et., al 2006).

En general, la adsorción desde una disolución a un sólido ocurre como consecuencia del carácter liofóbico (no afinidad) del soluto respecto al disolvente

particular, o debido a una afinidad elevada del soluto por el sólido o por una acción combinada de estas dos fuerzas.

El grado de solubilidad de una sustancia disuelta es el factor más importante para determinar la intensidad de la primera de las fuerzas impulsoras. Cuanta mayor atracción tiene una sustancia por el disolvente menos posibilidad tiene de trasladarse a la interfase para ser adsorbida.

En el caso de estudio el método de adsorción con carbón activo presenta buenos resultados para el Cadmio, a pesar del elevado coste de este sorbente. La cantidad máxima retenida para un  $pH_{eq}=8$  es de  $0'071\text{mmolCd/g}_{\text{sorbente}}$ . Este resultado mejora notablemente si el carbón activo recibe algún tipo de tratamiento previo. Así, el carbón activo tratado con ácido nítrico (ACF) presenta una capacidad máxima de sorción a  $pH=5-6$  de  $1'30\text{mmolCd/g}_{\text{sorbente}}$

La operación de adsorción requiere de cuatro pasos:

- Contacto del adsorbente y la solución
- El efectuarse la adsorción el soluto se une preferentemente a la superficie del adsorbente respecto a otros solutos.
- Lavado de la columna con la solución que no provoque la desorción del soluto de interés.
- Finalmente se efectúa la recuperación del soluto utilizando un fluido que favorezca la desorción. (Tomado de Tejada y col., 1995)

### 3.2.- Isotermas de adsorción

Las isotermas nos permiten estimar el grado de purificación que puede ser alcanzado, la cantidad de adsorbente requerido, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del producto.

Existen cuatro tipos básicos de isotermas:

- *Langmuir (Isoterma tipo I):*

Adsorción por afinidad, es una curva que relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto (Linares, 2006). El adsorbato cubre al adsorbente, hasta que se forma una monocapa y entonces el proceso se detiene. La gran mayoría de los procesos de quimisorción muestran este tipo de isoterma.

Es característico de procesos en los que se produce el llenado de los microporos. Como se verá extensamente, es el caso típico de los carbones activos. Su interpretación se contempla fundamentalmente desde el punto de vista de la teoría potencial de Polanyi-Dubinin.

El límite de capacidad del adsorbente es cuando la monocapa está completa (región asintótica en la gráfica).

La velocidad de adsorción es proporcional a la P y a la fracción de superficie NO cubierta

$$v_a = k_a P(1 - \theta)$$

En tanto que la velocidad de desorción solo depende de la fracción de superficie cubierta.

$$v_d = k_d \theta$$

En el equilibrio de adsorción – desorción se tiene que ( $v_a = v_d$ )

$$k_a P - k_a P \theta = k_d \theta$$

Si despejamos la fracción de superficie cubierta ( $\theta$ ); dividimos entre  $k_d$  y definiendo  $b = k_a / k_d$

$$\theta = \frac{k_a P}{k_d + k_a P} = \frac{bP}{1 + bP}$$

A presiones bajas la cantidad adsorbida es directamente proporcional a la presión

$$\theta = \frac{y}{y_m} = bP \quad y = y_m bP$$

A presiones altas en cambio se alcanza el límite de la capacidad del adsorbente (monocapa completa)

$$y = y_m$$

A presiones intermedias la cantidad adsorbida depende del coeficiente de adsorción o constante de equilibrio ( $b$ ) y por tanto también de la temperatura.

La limitante más importante de la isoterma de Langmuir es que supone que el calor de adsorción es independiente del recubrimiento de la superficie.

- *Freundlich* (isoterma tipo II):

Adsorción por intercambio iónico, recibe el nombre de isoterma de Freundlich, en este caso, cuando la formación de la monocapa de adsorbato es casi completa, un aumento en la concentración del adsorbato da lugar a una segunda capa de moléculas adsorbidas, estas son típicas de la adsorción física (Sánchez, 2004).

Aunque esta isoterma tiene un origen empírico, puede demostrarse teóricamente considerando que la magnitud del calor de adsorción varía exponencialmente con el recubrimiento de la superficie.

En esta isoterma no hay un recubrimiento límite ni se propone una adsorción monomolecular, sino multimolecular.

A presiones moderadamente bajas la dependencia de la cantidad adsorbida con la presión presenta un comportamiento del tipo:

$$y = kP^{1/n}$$

Ky n son constantes. El exponente 1/n varía entre 1 y 0.1.

- Isoterma tipo III:

Este tipo de isotermas son llamadas de BET (Brunauer, Emmett y Teller) son cóncavas hacia arriba en toda su longitud, son desfavorables para la captación del soluto.

- Isoterma tipo IV y V:

Aquí las sustancias no solo se adsorben en muchas capas moleculares, sino también se lleva a cabo la condensación del gas en los poros y capilares del adsorbente.

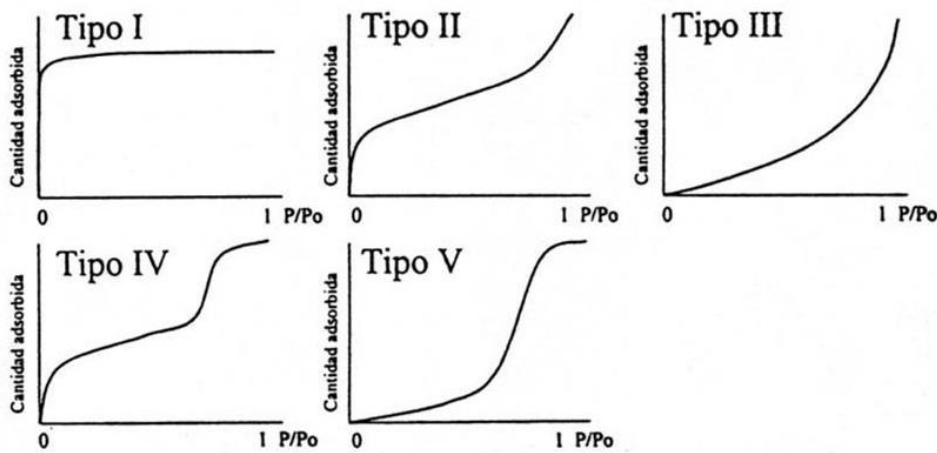


Figura 3.1 Isotermas de adsorción (Fuente: Perry, 2001; Sánchez, 2004)

### 3.3.- Tipos de adsorción

Cabe distinguir tres tipos de adsorción según que la atracción entre el soluto y el adsorbente sea de tipo eléctrico, de Van der Waals o de naturaleza química.

a) *Adsorción física:* causada principalmente por las fuerzas de Van der Waals y electrostáticas, dándose estas entre las moléculas del adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente (Treybal, 1986).

En estos casos la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre de trasladarse dentro de la interfase; esta adsorción, en general, predomina a temperaturas bajas, La adsorción de la mayoría de las sustancias orgánicas en el agua con carbón activado se considera de naturaleza física. Esto se aprecia en la Figura 3.2

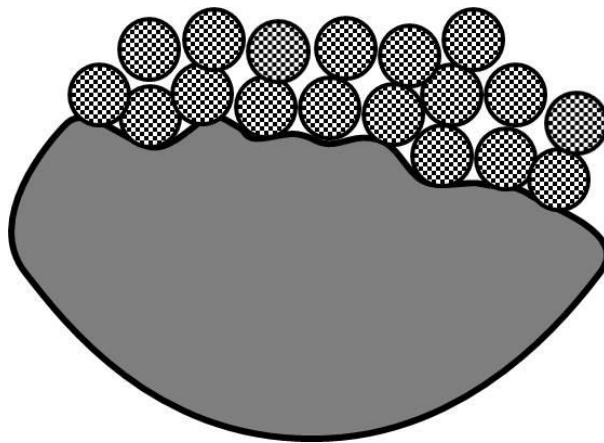
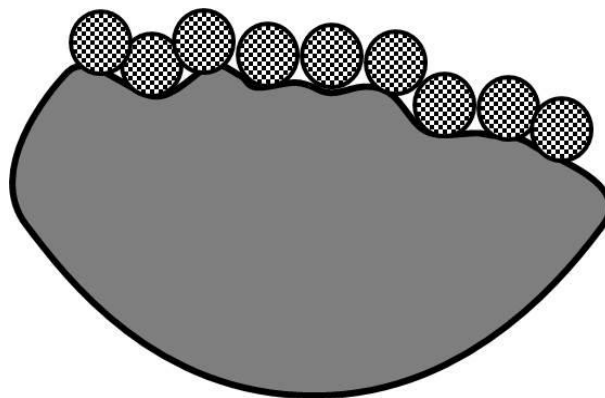


Figura 3.2 Adsorción física. Fuente: Propia del autor, 2014.

b) *Adsorción química:* es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. Se lleva a cabo cuando la sustancia se une a la superficie mediante fuerzas covalentes (Millán, 2008)

Las energías de adsorción son elevadas, del orden de las de un enlace químico, debido a que el adsorbato forma unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente, esta adsorción suele estar favorecida a una temperatura elevada. La mayor parte de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las tres formas de adsorción y, de hecho, no es fácil distinguir entre adsorción física y química

Una consecuencia importante de la quimisorción es que después de que la superficie se ha recubierto con una sola capa de moléculas adsorbidas, queda saturada; solo puede ocurrir adsorción adicional sobre la capa presente, y en general es de tipo débil, debido a ello Langmuir insistió en que la quimisorción incluye la formación de una capa unimolecular, pero la fisisorción puede dar origen a capas adicionales (Frington y Alberty, 1975; Atkins, 1986; Laidler y Meiser, 2003). (Millán, 2008), como se aprecia en la figura 3.3.



**Figura 3.3 Adsorción química, Fuente: Propia del autor, 2014**

c) *Intercambio iónico*: La adsorción cae de lleno dentro del intercambio iónico y a menudo se le llama adsorción por intercambio iónico (Linares, 2006). El proceso ocurre entre los iones mantenidos en la superficie (Laidler y Meiser, 2003). (Millán, 2008), este tipo de adsorción es un proceso mediante el cual los iones de una sustancia se concentran en una superficie como resultado de la atracción electrostática en los lugares cargados de la superficie. Para dos adsorbatos



iónicos posibles, a igualdad de otros factores, la carga del ión es el factor determinante en la adsorción de intercambio. Para iones de igual carga, el tamaño molecular (radio de solvatación) determina el orden de preferencia para la adsorción.

### **3.4.- Adsorción como tratamiento para iones metálicos**

Se presenta el fenómeno de adsorción química como una opción viable en el tratamiento de aguas residuales que contiene disueltos iones metálicos, específicamente se señalan algunas investigaciones, en las cuales se emplearon biomateriales:

- La eliminación de Cromo hexavalente por biomateriales naturales con el método de adsorción, independientemente de los tipos de biomateriales, Cr (VI) se eliminó completamente de la fase acuosa y el Cromo enlazado a su superficie estaba en forma trivalente, un factor importante fue el tiempo de concentración del Cr (VI) en la fase acuosa. En conclusión, el principal mecanismo de eliminación de Cr (VI) por biomateriales naturales es la adsorción.

(Donghee Park *et al.*, 2007)

- La eliminación de colorante azul de metileno a partir de soluciones acuosas mediante adsorción se llevó a cabo con cascara de maracuyá como adsorbente, la cáscara de fruta de la pasión amarilla es un material disponible localmente, de bajo costo y puede ser utilizado como un adsorbente alternativa para la eliminación de MB u otros colorantes catiónicos a partir de soluciones acuosas sin ningún tratamiento previo. La adsorción de MB dependía de pH y tiempo de contacto. El pH óptimo para la adsorción de MB estaba en el intervalo de 7-10 y el tiempo de contacto agitación necesaria para el equilibrio fue de 50 h. La capacidad máxima de

adsorción después de 50 h de tiempo de contacto con un pH de 9,0 y una temperatura de 25 ° C fue 0,0068 mmol g<sup>-1</sup> de adsorbente.

Los estudios preliminares indicaron que la cáscara de fruta de la pasión amarilla podría ser utilizada eficazmente en los procesos de corrección para la eliminación cuantitativa de azul de metileno. Como el nuevo bioadsorbente es un material de bajo costo, el proceso de tratamiento demuestra ser económico y efectivo para la adsorción del colorante.

(Pavan, *et al.*, 2008)

- El estudio de adsorción de colorante azul de metileno mediante biomasa de arroz se centró principalmente para establecer la viabilidad del uso de residuos de biomasa arroz estado después de la extracción de azúcar como un adsorbente de bajo coste para el teñido de las aguas residuales. El azúcar se extrajo de la biomasa a partir de una necesaria eliminación de residuos adecuada en la planta de bioetanol celulósico que podría añadir carga financiera de la industria. La utilización de tal biomasa si se utiliza como adsorbente no sólo puede reducir al mínimo su coste de eliminación sino también puede eliminar colorantes orgánicos de las soluciones acuosas. La adsorción se investigó utilizando el diseño estadístico de experimento para investigar los efectos de los factores experimentales. La concentración de colorante apareció como el factor más crítico en términos de capacidad de adsorción y eliminación del color, el equilibrio y las investigaciones termodinámicas verificaron la factibilidad de arroz como biomasa para su aplicación como un adsorbente.

(Saif Ur Rehman *et al.*, 2012)

- La eliminación de azul de metileno por adsorción mediante cáscara de ajo el cual es considerada una biomasa de residuos agrícolas, se encontró que era muy eficaz para eliminar MB a partir de soluciones acuosas. Los datos de equilibrio se analizaron utilizando los modelos de isothermas de

Langmuir, Freundlich, y Temkin. Se encontró que las capacidades máximas de adsorción monocapa ser 82,64, 123,45 y 142,86 mg / g en 303, 313 y 323 K, respectivamente. Datos de equilibrio muy bien equipados con la ecuación isoterma de Freundlich. La cinética del proceso de adsorción se encontró a seguir el modelo cinético de pseudo-segundo orden, por lo que se concluye que la cáscara de ajo es buen biomaterial para adsorción de colorantes. ( Hameed y Ahmad, 2008)

- En el desarrollo de un adsorbente basado en taninos de corteza *pinus pinaster* para la eliminación de Pb, Cu, Zn, Cd y Hg de disoluciones acuosas, se estudió la preparación de un adsorbente basado en la reacción de taninos de corteza de *Pinus pinaster* con formaldehído. Se analizó la influencia de las condiciones de preparación sobre las características de las partículas de gel de taninos obtenidas y se comprobó su capacidad como adsorbente de Cadmio. Los taninos de corteza de *Pinus pinaster* utilizados en este trabajo fueron obtenidos por extracción con una disolución acuosa de NaOH en condiciones de operación previamente optimizadas (Vázquez *et al.*, 2001). El comportamiento reológico de las disoluciones acuosas de taninos se determinaron en un viscosímetro Brookfield DV-II+, y el tiempo de gel en un medidor Techne GT-3 empleando una relación de 0,1 g formaldehído/ 10 g taninos.

Para comprobar la capacidad de adsorción de las partículas de taninos, se pusieron en contacto 100 mg/L de una disolución acuosa de 100 ppm de Cd<sup>2+</sup>, preparada a partir de acetato de cadmio dihidratado, con 1 g de partículas y se mantuvieron a 25°C durante 24 h en un baño con agitación orbital. Tras el proceso de adsorción se observó la superficie de las partículas de taninos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y se obtuvo el espectro de dispersión de rayos X.

(G. Vázquez *et al.*, 2004)

- En el estudio de remoción de Cadmio mediante adsorción utilizando fibra de pluma de pollo se investiga la aplicación de la fibra de pollo como biosorbente de bajo costo para la remoción de Cadmio en soluciones acuosas. Se obtuvieron las cinéticas de adsorción de Cadmio a 30 °C empleando soluciones con concentraciones desde 10 hasta 50 ppm. Los resultados obtenidos indican que el estado de equilibrio se alcanza después de 48 horas de contacto a las condiciones de estudio. Se estableció que la capacidad de adsorción de la fibra varía entre 2.16 y 4.97 mg/g.

Las plumas de pollo se obtuvieron directamente de la planta de procesamiento de Sabropollo y fueron sometidas a un lavado exhaustivo con detergente y una mezcla de agua desionizada y alcohol etílico (20% de contenido de alcohol). Este proceso se repitió varias veces hasta eliminar totalmente la materia orgánica. Las plumas lavadas se enjuagaron finalmente con agua desionizada y se secaron a temperatura ambiente. De las plumas secas se obtuvo la fibra (biosorbente) retirando el raquis en forma manual. La fibra se sometió a un secado final a 50 °C durante 4 horas previamente a su aplicación en los experimentos de remoción.

Los experimentos de adsorción se realizaron empleando la fibra de la pluma de pollo y soluciones de Cadmio preparadas en el laboratorio. Las soluciones de Cadmio fueron preparadas con  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  grado reactivo y agua desionizada. Se realizaron cinéticas de adsorción para diferentes soluciones de Cadmio con concentraciones iniciales entre 10 y 50 ppm. Los experimentos se llevaron a cabo en condiciones batch a 30 °C empleando 50 ml de la solución y 0.2 g del adsorbente. No se utilizó algún mecanismo de agitación en los experimentos realizados.

La concentración de Cadmio se cuantificó con un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin curva de calibración Elmer Analyst 100 empleando el método de flama. Previamente a las cuantificaciones, se realizó la del equipo empleando soluciones estándares en un rango de concentración de

2 a 12 ppm. Los resultados obtenidos de las cinéticas de adsorción sirvieron para calcular la cantidad de Cadmio adsorbida en la fibra de pluma de pollo.

Bajo las condiciones de estudio, la fibra es capaz de reducir el contenido de cadmio en estas soluciones desde 39 hasta un 86%.

(E. Reynel-Avila *et al.*, 2008)

- En el estudio de remoción de Cadmio (II) de soluciones acuosas mediante carbón activado preparado a partir de caña, se estudió la factibilidad de remover iones Cadmio de soluciones acuosas diluidas mediante carbón activado obtenido por activación química con ácido fosfórico de una especie de caña de fácil crecimiento. Se determinaron las características químicas y de superficie del carbón activado resultante y se examinó su efectividad en la remoción de iones Cd (II). Las características estructurales y su performance en la adsorción de iones Cd (II) resultaron superiores a las determinadas para un carbón comercial empleado con fines comparativos. El carbón activado preparado a partir de caña exhibió un área específica de 1100 m<sup>2</sup>/g y un volumen total de poros de 1cm<sup>3</sup>/g, alcanzando una efectividad en la remoción de Cd (II) del 95 %. Estos resultados indican que el mismo puede ser eficientemente utilizado para reducir el nivel de Cd (II) del agua cuando éste excede los límites sanitarios admisibles.

Las características estructurales del carbón activado preparado a partir de una especie de caña de rápido crecimiento mediante el proceso de activación química con ácido fosfórico, y su performance en la adsorción de iones Cd (II) de soluciones acuosas diluidas, resultaron superiores a las determinadas para un carbón comercial empleado con fines comparativos. El carbón activado preparado presenta un área específica de 1100 m<sup>2</sup>/g y volumen total de poros de 1cm<sup>3</sup>/g, alcanzando una efectividad en la remoción de Cd (II) del 95 %. El modelo de Toth representa satisfactoriamente la isoterma de adsorción de iones Cadmio sobre el

carbón de caña. Los resultados obtenidos indican que estos carbones son altamente eficientes para la remoción de cadmio de soluciones acuosas diluidas, sugiriendo la posibilidad de su utilización en emprendimientos tendientes al saneamiento y conservación del medio ambiente.

(Basso, *et al.*, 2008)

- Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zumo de maíz para la adsorción de Cadmio y Plomo es un estudio donde en cada experimento se pesaron aproximadamente 0.2000 gramos de cada carbón y se les adicionaron 50.00 ml de las soluciones de Cd(II) y Pb(II) de 18.0 ppm y se agitaron a 120 rpm por 18 horas a temperatura ambiente. Luego se filtró la solución y los metales se determinaron por espectroscopia de absorción atómica con llama de acetileno-aire. Se prepararon curvas de calibración de patrones de 0.050, 0.100, 1.000, 2.000 y 5.000 ppm para Pb (283.3 nm) y de 0.100, 0.200, 0.500, 1.000 y 2.500 ppm para Cd (228.8 nm) con un coeficiente de correlación mínimo de 0.999; los patrones y las soluciones de intercambio se prepararon con estándares certificados de 1000.0 ppm (Sigma) de cada uno de los metales.

Se prepararon carbones activados con bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para adsorber cadmio y plomo de soluciones acuosas. El bagazo de caña y zuro de maíz fueron carbonizados, activados con ácido fosfórico y oxidados con ácido nítrico o peróxido de hidrógeno y posteriormente calcinados en atmósfera de Nitrógeno. La activación con ácido fosfórico causó un aumento en el área superficial. En general, una mayor cantidad de grupos oxigenados fue fijada por el oxidante peróxido de hidrógeno y se observó un aumento en la cantidad de grupos ácidos con las oxidaciones. Se obtuvieron carbones activados con altas capacidades de adsorción de Cadmio y Plomo que por lo general dependieron de la porosidad de los carbones. Los carbones activados fueron más selectivos para adsorber Cadmio que Plomo. En general, los metales se removieron con mayor

facilidad cuando se encontraban solos que combinados y la adsorción de Plomo fue afectada más por la presencia de Cadmio que lo contrario. La implementación de este método de activación en dos etapas no favoreció la capacidad de adsorción de los carbones activados.

(Primera-Pedrozo, et al., 2008)

## **CAPITULO IV**

### **Metodología**



#### 4.1.- Diagrama general

La fase experimental de esta investigación se realizó con base en la Figura. 4.1.

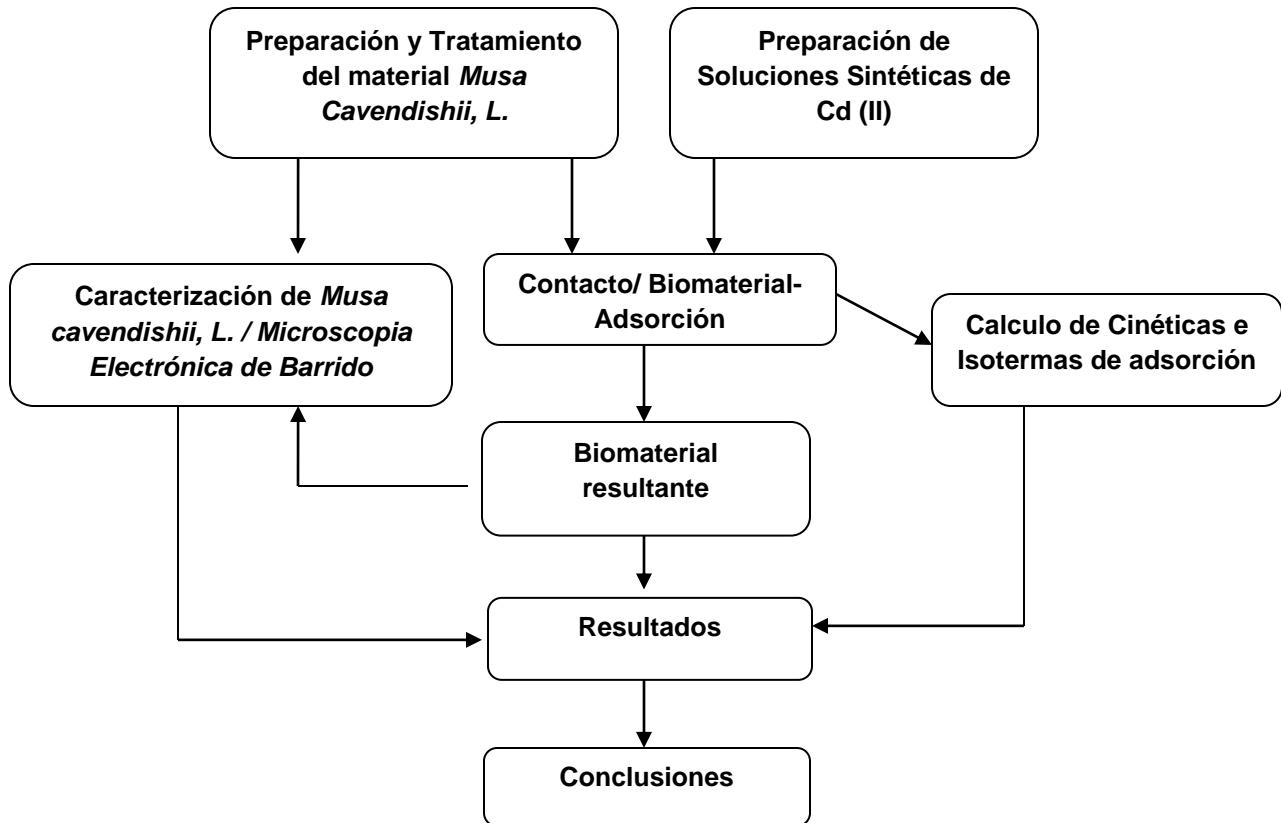


Figura 4.1.- Diagrama de Bloques de la fase experimental, Fuente: propia del autor. 2014

#### 4.2.- Desglose de actividades

##### 4.2.1.- Preparación de la cascara de plátano

###### 4.2.1.1.- Tratamiento físico

La cáscara del *Musa cavendishii* L. se secó al aire por 7 días, para posteriormente deshidratarla en estufa a 70°C, por 5 horas. Una vez seco el material, se trituro con la ayuda de un molino Wiley G.E. No. 4352 hasta la obtención de partículas

finas. El material se tamizó a malla 40 (425  $\mu\text{m}$ ). Se consideró dicho tamaño de partícula debido a que es el mayormente utilizado en trabajos relacionados con adsorción mediante adsorbentes naturales (biosorbentes), además de que a menor tamaño de partícula, mayor superficie específica y, por lo tanto, mayor porcentaje de remoción (Boniolo, 2005; Roa 2011). Esta cantidad de biomaterial fue dividida en dos porciones, la primera se manejó de manera natural el biomaterial. La segunda se le dio un tratamiento químico que en el siguiente punto se explica.

#### 4.2.1.2.- Tratamiento Químico

Se tomó la porción del biomaterial y se agregó ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en una proporción de 1g: 2 ml. Esto con la finalidad de oxidar la superficie del biomaterial. Finalmente ambas porciones se manejaron para llevar a cabo los contactos entre las soluciones sintéticas de Cd (II) y la *Musa cavendishii*, L.

#### 4.2.2.- Preparación de soluciones de Cd (II)

Se pesaron 0.816 g de  $\text{CdCl}_2$  y se transfirieron a un matraz aforado de 1 L con la finalidad de preparar una solución madre de  $500 \text{ mgL}^{-1}$  de Cd, a dicha solución se le agregaron pequeños volúmenes de HCl diluido con la finalidad de fijar el pH alrededor de 4 para encontrar al Cd (II) en solución, esto se realizó con base en el estudio del diagrama de predominio de especies para el cadmio, esto se aprecia en la Figura 4.2.

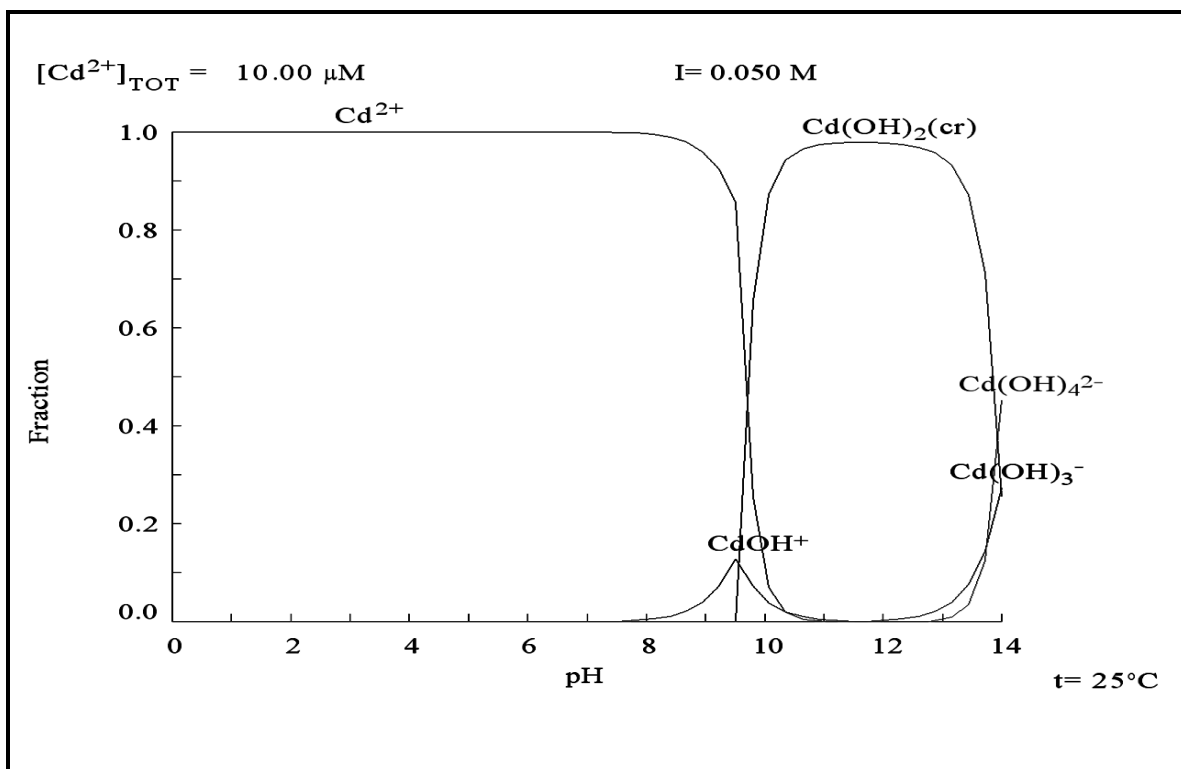


Figura 4.2.- Diagrama de predominio de especies para el  $\text{Cd}^{2+}$ . Fuente: Elaboración propia del autor, 2014

Posteriormente de la solución madre mediante el método de diluciones, se prepararon soluciones de 5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60  $\text{mgL}^{-1}$  del mismo analito. Fijando el pH de cada solución mediante la incorporación de pequeños volúmenes de una solución diluida de HCl, hasta alcanzar un valor entre 2 y 3.

#### 4.2.3.- Tiempo de contacto

De los tipos de biomaterial (Natural y Químico) *Musa cavendishii*, L., se pesaron 100 mg y se transfirieron a tubos de ensayo, para llevar a cabo los contactos de adsorción. De cada una de las soluciones sintéticas de Cadmio se tomaron 10 ml, los cuales se pusieron en contacto con el biomaterial en tubos de ensayo.

La adsorción se llevó a cabo mediante un rotor (Ver Figura 4.3.) donde se colocaron los tubos de ensayo, los tiempos de contacto fueron de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos, este proceso se realizara por triplicado.



Figura 4.3.- Rotor Mecánico. Fuente: Propia del autor, 2014

#### **4.2.4.- Caracterización de *Musa cavendishii*, L. empleando Microscopia Electrónica de Barrido**

El biomaterial que se obtuvo tanto de manera natural como del tratamiento químico, se secó en estufa por tres horas a 50°C y posteriormente se colocó en un soporte de grafito, el cual se introdujo en un Microscopio Electrónico Philips XL-30 a bajo vacío, que se encuentra en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), para obtener las imágenes y el microanálisis correspondientes. Esta actividad también se realizó después de los contactos de adsorción con la intención de corroborar la presencia del Cadmio en el biomaterial. Cabe señalar que debido a la demanda de este equipo por los investigadores del propio instituto se realizaron análisis representativos del proceso de adsorción.

## **4.2.5.- Resultados**

### *4.2.5.1.- Determinación del Cadmio por absorción atómica*

Una vez que se cumplieron los tiempos a diferentes concentraciones de Cadmio, se llevara a cabo la separación del biomaterial, mediante filtración. Las soluciones resultantes de los contactos se llevaron a un equipo de absorción atómica marca Varian SpectrAA 10 plus, el cual se encuentra en la Facultad de Química de la UAEM, el cual funcionó a las siguientes condiciones: una lámpara de cátodo hueco de Cd, longitud de 228.8 nm, flujo de aire 13.50 Lmin<sup>-1</sup>, flama de aire/acetileno y un flujo de acetileno de 2 Lmin<sup>-1</sup>. Con dicho equipo se determinaron las concentraciones correspondientes al Cadmio disuelto en la fase líquida.

### *4.2.5.2.- Determinación de remoción de Cadmio*

Como se mencionó las soluciones resultantes contendrán el Cadmio que no fue adsorbido por el biomaterial, con las concentraciones generadas del equipo de absorción atómica, se determinaron los porcentajes de remoción.

### *4.2.5.3.- Isotermas de adsorción*

Los resultados obtenidos por los experimentos de adsorción se analizaron mediante los modelos de Langmuir, Freundlich. Las isotermas de adsorción permiten determinar el comportamiento del adsorbente y su eficiencia en la remoción de contaminantes (Sánchez, 2004). Las fórmulas de cada uno de los modelos son las siguientes:

#### **Modelo de la isoterma de langmuir**

$$q_e = \frac{Q_o b C_e}{1 + b C_e}$$

Donde:

$q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (  $\text{mgg}^{-1}$  )

$Q_0$  = Cantidad de moles soluto adsorbido que forma una monocapa por peso unitario de adsorbente (  $\text{mgg}^{-1}$  )

$b$  = Constante empírica (  $\text{L mg}^{-1}$  )

$C_e$  = Concentración en equilibrio (  $\text{mgL}^{-1}$  )

### **Modelo de la isoterma de Freundlich**

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

Donde:

$q_e$  = Cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (  $\text{mgg}^{-1}$  )

$K_f$  = Constante de Freundlich (  $\text{mgg}^{-1}$  )

$1/n$  = Coeficiente de Freundlich

$C_e$  = Concentración en equilibrio (  $\text{mgL}^{-1}$  )

Para el cálculo de  $q_e$  y  $C_e$  debemos de considerar que en el experimento  $C_e$  es la concentración de Cd (II) en la solución después del tiempo de contacto, para calcular  $q_e$  tenemos que realizar lo siguiente:

$$q_e = (C_0 - C_e) ( \text{ml soln agregados} ) / \text{grs del sorbato utilizado}$$

Por lo cual al sustituir los valores el resultados es 10 ml de solución agregada equivale a 0.01 L y los 100 mg de sorbato utilizado equivalen a 0.1 g. Y Con estas dos variables se calculan las correspondientes isotermas de Langmuir y Freundlich.

**CAPITULO V**  
**Resultados**

## 5.1.- Preparación de la cáscara de plátano

### 5.1.1.- De forma natural.

Una vez realizadas las actividades de molienda, tamizado y secado del biomaterial, este se almacena en un recipiente seco, con la finalidad de evitar posibles hidrataciones y que esto pudiera influir en los porcentajes de remoción del Cadmio. El biomaterial se puede apreciar en la Figura 5.1. a, b y c.

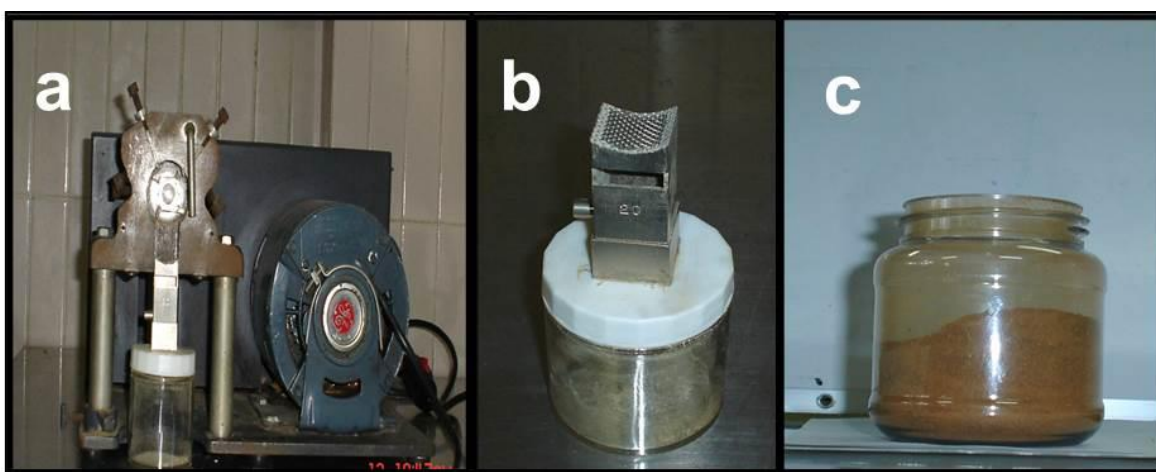


Figura 5.1. a) Molienda, b) Tamizado, c) Almacenado del biomaterial. Fuente: Propia del autor, 2014.

### 5.1.2.- Tratamiento químico

Como se sabe la mayoría de las cáscaras de biomateriales contienen en un alto porcentaje de compuestos orgánicos tales como la lignina y la hemicelulosa, que en un inicio de esta investigación por los grupos funcionales que poseen se especuló que estos ayudarían a la adsorción del Cadmio disuelto en las soluciones sintéticas. Pero con base en la búsqueda bibliográfica se determinó darle al biomaterial un tratamiento químico con el ácido sulfúrico que es de carácter oxidante.

Con la adición del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al biomaterial, se provocó la remoción completa de la lignina y hemicelulosa (Lugo, 2009). El ácido rompió las cadenas



de celulosa lo que permitió aumentar la accesibilidad al área superficial (Yang, 2007) e incrementar la estabilidad del material adsorbente, lo que aumentó los sitios activos capaces de adsorber los metales en solución (Salcedo *et al.*, 1992; Unnithan *et al.*, 2004).

Después de estar en contacto con  $H_2SO_4$  durante 24 horas, el biomaterial cambió su color y textura; de manera natural presentaba una coloración café, ya tratado químicamente ésta cambió a negro y su textura se volvió suave, tal como se muestra en la Figura 5.2.

La modificación del biosorbente con  $H_2SO_4$  disminuyó las sustancias orgánicas provenientes de los lixiviados, de este modo el biomaterial se lavó una sola vez con agua desionizada.



Figura 5.2. Tratamiento químico del biomaterial *Musa cavendishii*, L. Fuente: Propia del autor, 2014.

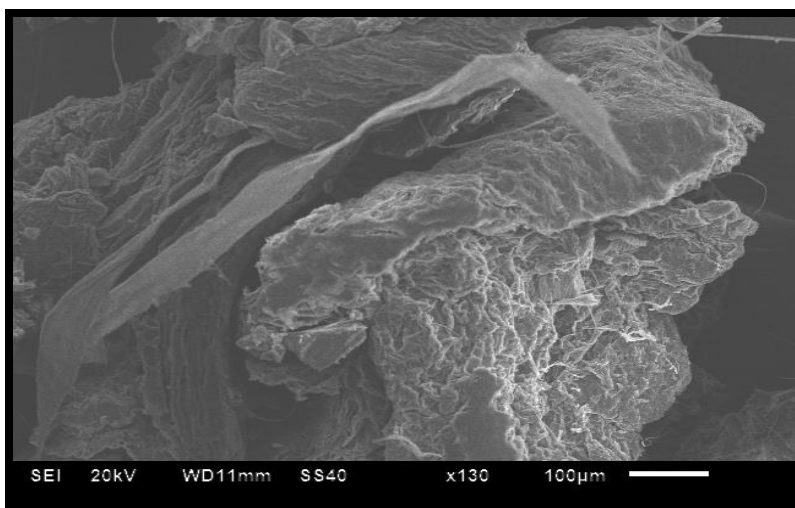
## 5.2.- Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Para estudiar la capacidad de sorción del *Musa cavendishii*, L. fue necesario aplicar algunas técnicas para la caracterización del material, tales como la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), la cual se considera como una de las más versátiles para la visualización y el análisis de las características microestructurales de muestras sólidas, lo que permite una visualización

tridimensional, además de una identificación tanto cualitativa, como cuantitativa (puntual, lineal o superficial), de los elementos químicos de la muestra (Linares, 2006; Raize *et al.*, 2004).

### 5.2.1.- *Musa cavendishii*, L. natural

La Figura 5.3 corresponde a la morfología del biomaterial *Musa cavendishii*, L. en forma natural, se trata de una muestra vista a un acercamiento (zoom) de 130X y analizada a un tamaño de 100µm. Se puede apreciar un material de forma irregular, de textura rugosa y con una estructura poco porosa.



**Figura 5.3. Morfología del *Musa cavendishii*, L. natural. Fuente: Propia del autor, 2014.**

En la Figura 5.4 se presenta el microanálisis realizado al biomaterial *Musa cavendishii*, L. en forma natural. Se puede apreciar la composición principal del material, la altura del pico es directamente proporcional a la concentración del elemento, el pico de mayor tamaño corresponde al carbono (C) que es un componente básico en un biosorbente, al igual que el oxígeno (O), de ahí el prefijo “bio”. Se puede apreciar también la presencia del potasio (K), un elemento que forma parte elemental de la constitución del plátano. El Cloro también se

manifiesta, esto tiene su justificación, ya que todo el material de vidrio con el que se trabajó estuvo en contacto con soluciones de HCl y a pesar de fue lavado de manera minuciosa, no se descarta una pequeña contaminación. Finalmente el Silicio (Si), la presencia de este elemento se puede deber a las impurezas presentes en el ambiente al momento del transporte y colocación de la muestra en el microscopio. Posteriormente en el Tabla 5.1 se presentan los porcentajes de los elementos contenidos en la muestra.

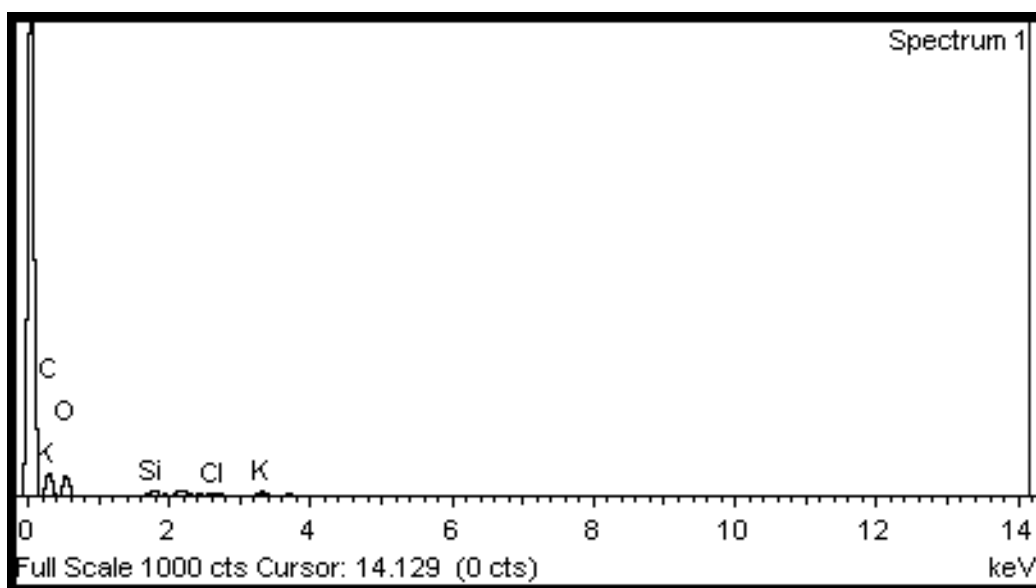


Figura 5.4. Microanálisis del *Musa cavendishii*, L. natural. Fuente: Propia del autor, 2014

Tabla 5.1. Porcentajes de los elementos contenidos en la muestra del *Musa cavendishii*, L. natural.

Elemento	% en Peso	% Atómico
C	51.19	59.11
O	45.69	39.61
Si	0.96	0.47
Cl	0.94	0.37
K	1.23	0.44
Total	100	100

Fuente: Propia del autor, 2014

### 5.2.2.- *Musa cavendishii*, L. tratado con $H_2SO_4$

La Figura 5.5 pertenece al biomaterial *Musa cavendishii*, L. tratado con  $H_2SO_4$ . La morfología se tomó a un acercamiento (zoom) de 100X y fue analizada a un tamaño de  $100\mu m$ . Se puede apreciar un material de forma irregular, de textura grumosa que a diferencia del biomaterial natural, presenta una estructura sumamente porosa que indica y corrobora la activación adecuada del biomaterial, el aumento en la cantidad y tamaño de los poros, lo que lleva a que el contaminante encuentra una mayor cantidad de sitios activos que favorecen la adsorción.

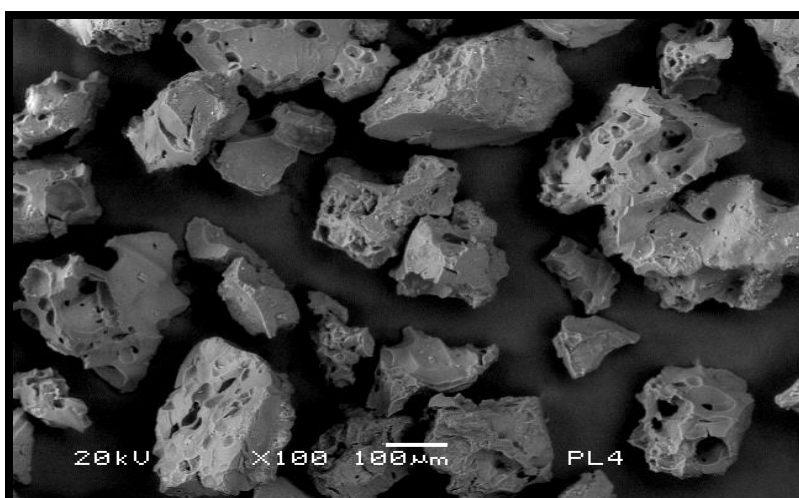


Figura 5.5. Morfología del *Musa cavendishii*, L. tratado con  $H_2SO_4$ . Fuente: Propia del autor, 2014

Por otro lado la Figura 5.6 corresponde al microanálisis realizado al biomaterial *Musa cavendishii*, L. tratado con  $H_2SO_4$ . Al igual que en el microanálisis anterior, se puede apreciar de mayor tamaño el pico que corresponde al Carbono (C) y en una menor proporción el Oxígeno (O), nuevamente se encuentra el Potasio (K), el Calcio (Ca) y el Silicio (Si). Sin embargo, están presentes dos elementos importantes, uno de ellos es el Azufre (S) perteneciente al ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

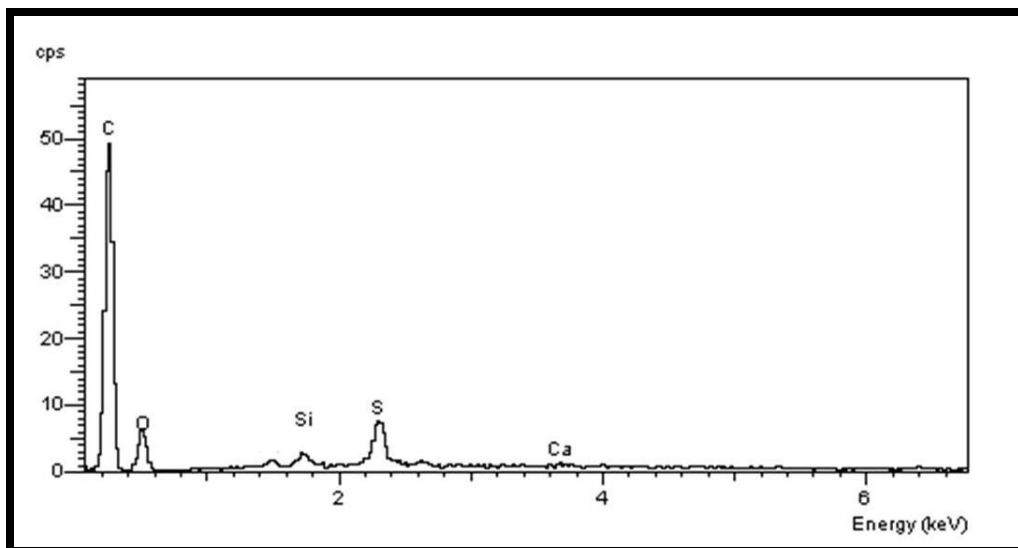


Figura 5.6. Microanálisis del biomaterial tratado con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Fuente Propia del autor, 2014

### 5.3.- Porcentajes de remoción del Cadmio

Como se mencionó anteriormente las concentraciones de Cadmio disuelto en las soluciones generadas de los contactos se cuantificaron por absorción atómica. Los resultados se muestran en la Tabla 5.2 y 5.3.

Tabla 5.2. Concentraciones de cadmio en la biomasa de manera natural

	Concentración (mgL <sup>-1</sup> )						
	5	10	20	30	40	50	60
Tiempo (min)	% Remoción						
0	0	0	0	0	0	0	0
5	64.3	62.01	60	59.8	53.3	46.23	46
10	67.2	65.15	63.09	62.15	55.5	47.5	47.2
15	67.3	65.3	63.3	62.3	55.77	48.35	48
20	67.3	65.3	63.6	62.45	56.22	49.1	48.1
25	68	66	64	63.3	56.72	49.1	48.1
30	68	66	64	63.5	56.72	49.15	48.15

Fuente: Propia del autor, 2014

En la Tabla 5.2. se aprecia claramente que conforme aumenta el tiempo de contacto, los porcentajes de remoción van disminuyendo, esto indica claramente que los sitios activos ( en este caso grupos funcionales) donde se llevó la

adsorción son ocupados rápidamente en los primeros 5 minutos, ya que se distingue un incremento entre el valor inicial ( cero) y el valor final ( a los 5 minutos). No así en los otros intervalos que los incrementos son considerablemente menores.

**Tabla 5.3 Concentraciones de cadmio en la biomasa tratada químicamente**

	Concentración (mgL <sup>-1</sup> )						
	5	10	20	30	40	50	60
Tiempo (min)	% Remoción						
0	0	0	0	0	0	0	0
5	73.14	68.4	65.5	66.5	60.2	57.56	55.2
10	75.83	72.6	68.23	68.23	61.47	58.23	56.47
15	77.6	74.6	68.3	68.3	61.85	58.6	56.85
20	78.4	75.3	68.3	68.3	62.8	58.6	57.5
25	78.5	75.3	69.06	69.06	62.7	59.03	58.4
30	78.5	75.3	69.06	64.06	63	59.03	58.4

**Fuente: Propia del autor, 2014**

En la Tabla 5.3 se detecta que el comportamiento de los datos sigue el mismo patrón que en la Tabla 5.2. es decir que en los 5 primeros minutos el incremento del porcentaje de remoción es alto, y conforme aumenta el tiempo de contacto estos incrementos van disminuyendo. Pero se aprecia claramente que los porcentajes de remoción en comparación con los mostrados en la Tabla 5.2 son mayores.

Esto indica que el tratamiento químico que se le dio al biomaterial fue determinante, esto se justifica debido a que la superficie del biomaterial fue oxidado, lo que provocó que aumentaran los sitios disponibles donde se llevó a cabo la adsorción del Cadmio. Por esta razón este tipo de tratamiento ha sido recomendado por otros autores, con el objetivo de mejorar la adsorción del analito según sea el caso en cada investigación que involucre dicho fenómeno.

De las tablas anteriores se realizaron las correspondientes graficas de porcentajes de remoción, que se muestran en las Figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10, las dos primeras figuras corresponden la biomaterial manipulado de manera natural y las do últimas figuras conciernen al biomaterial que fue tratado químicamente.

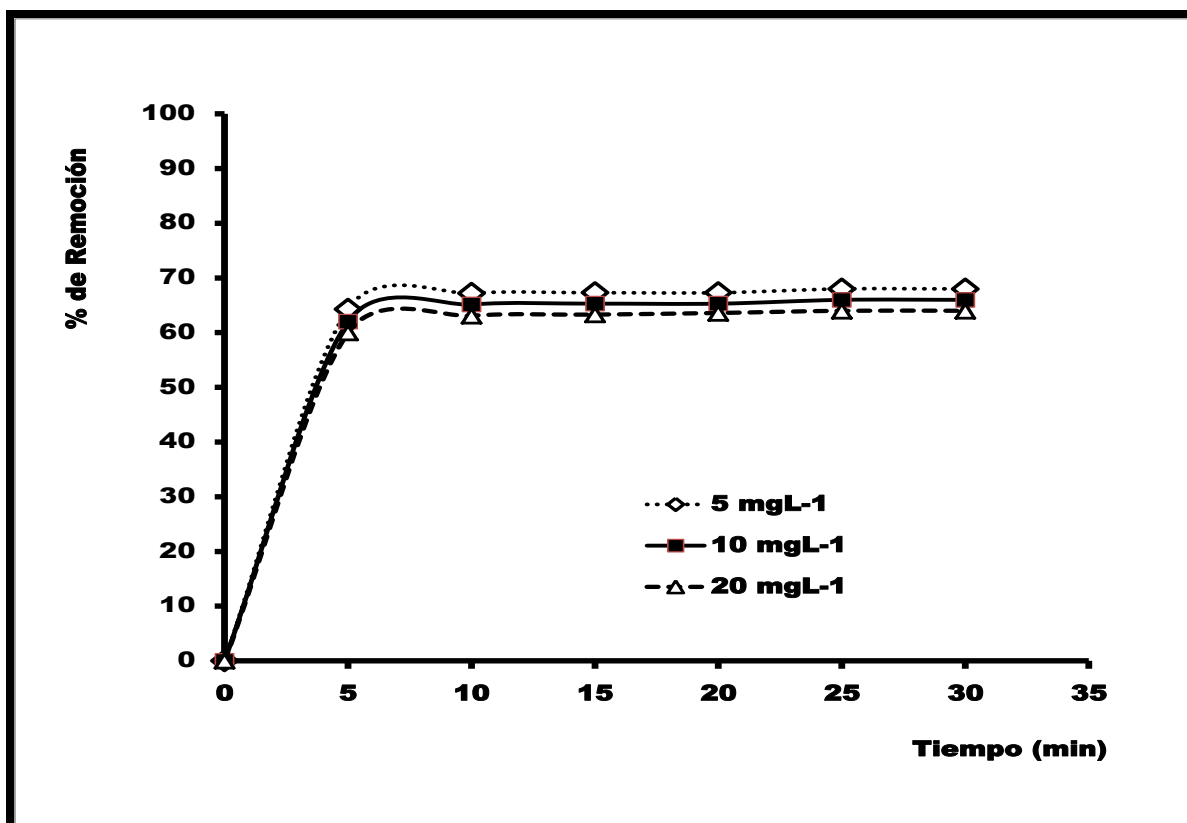


Figura 5.7.- Porcentaje de remoción para las concentraciones de 5,10, 20 mgL<sup>-1</sup>, para biomaterial de manera natural. Fuente: propia del autor, 2014.

En esta grafica se aprecia que a los 5 minutos de contacto se alcanzan casi las máximas remociones para el Cadmio, posteriormente el comportamiento es muy similar, ya que dichos porcentajes no se modifican mucho en su valor. Como se puede apreciar para la concentración de 5 mgL<sup>-1</sup> los porcentajes son los mejores alcanzando valores de casi el 70 %. Conforme aumenta la concentración los porcentajes van disminuyendo un poco, de hecho los porcentajes de remoción son muy cercanos entre sí. Esto significa que el utilizar el biomaterial de manera natural en las concentraciones señaladas tiene un efecto directo en la captación

del Cadmio disuelto en fase acuosa. Con esto se propone que los grupos funcionales característicos ( $\text{OH}^-$ ) de la celulosa participan en la captación del analito señalado.

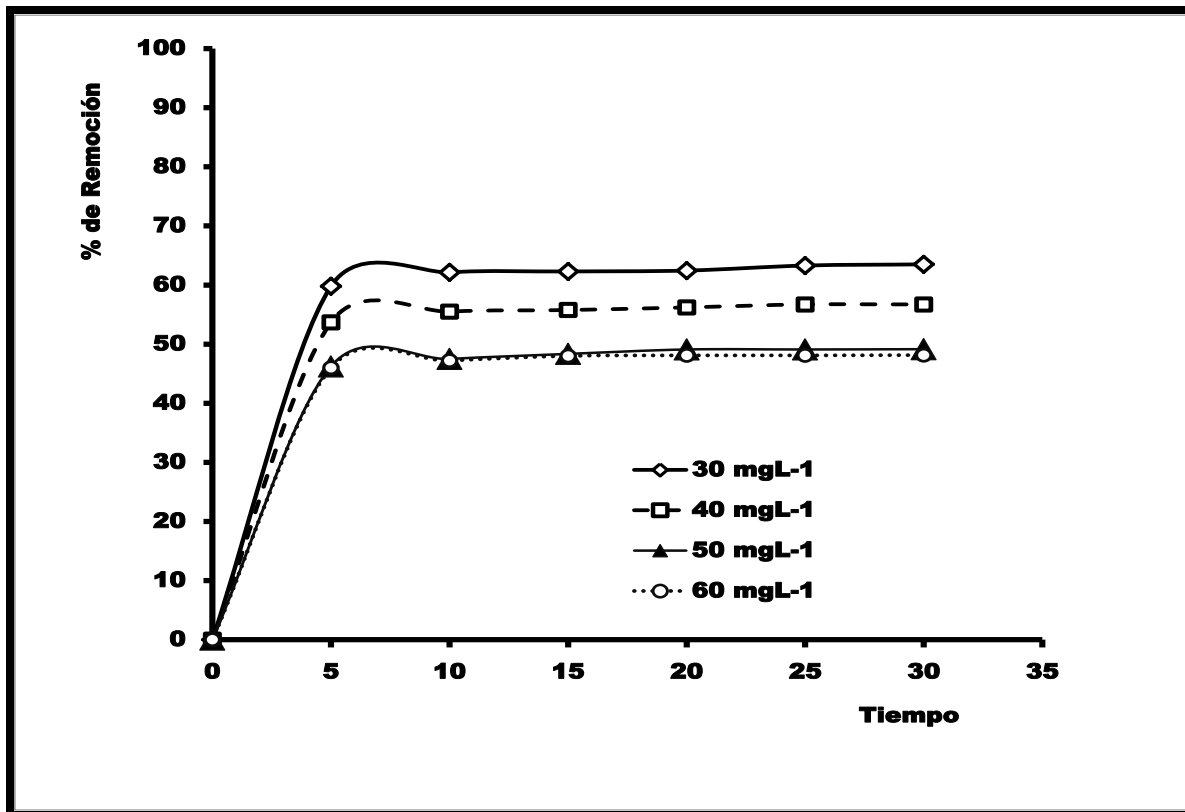


Figura 5.8.- Porcentaje de remoción para las concentraciones de 30, 40, 50 y 60  $\text{mgL}^{-1}$ , para biomaterial de manera natural. Fuente: propia del autor, 2014.

En la Figura 5.8 el comportamiento es igual, es decir a los 5 minutos casi se alcanza el mayor porcentaje de remoción, posteriormente los valores se modifican muy poco de ahí que en la gráfica se forme un sección horizontal. Lo que se establece es que conforme aumenta la concentración del Cadmio en solución los porcentajes disminuyen hasta llegar a valores cercanos al 48 %, esto indica nuevamente que los sitios activos donde ocurre la adsorción son ocupados rápidamente en los primeros minutos de contacto, posteriormente es más difícil que se lleve a cabo esta adsorción, esto se corrobora con base en los resultados generados a los 30 minutos del proceso. Con lo anterior se propone que los grupos funcionales son saturados en los primeros minutos del contacto con los



iones Cadmio, posteriormente como los todos grupos hidroxilo del biomaterial cumplieron su función de adsorción y/o atracción, estos ya no pueden cumplir este mismo comportamiento de ahí que bajen los porcentajes de remoción en los experimentos donde la concentración de la soluciones sintéticas son más altas.

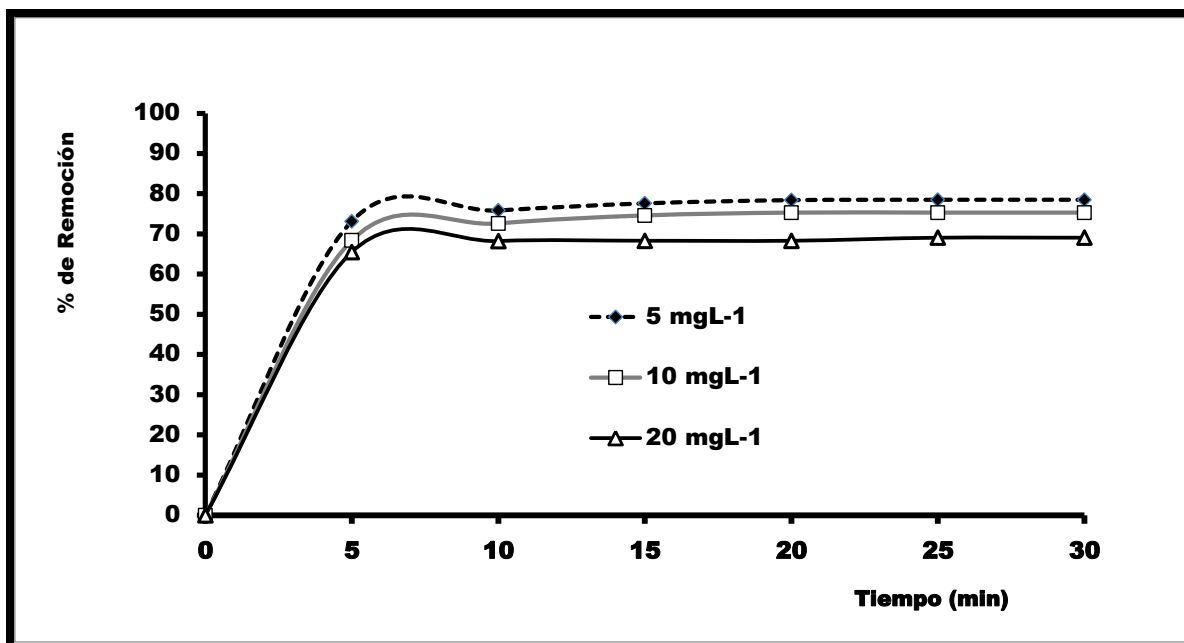


Figura 5.9.- Porcentaje de remoción para las concentraciones de 5, 10, y 20 mgL<sup>-1</sup>, para biomaterial tratado químicamente. Fuente: propia del autor, 2014.

En la Figura 5.9 los porcentajes de remoción mejoran en comparación con la biomasa que se empleó de manera natural, esto indica que el proceso del tratamiento químico mejora dichos porcentajes. Este comportamiento se debe a que el ácido sulfúrico es un oxidante y por lo cual oxida la superficie del biomaterial aumentando la porosidad del biomaterial, por lo tanto al aumentar esta porosidad aumento también el porcentaje de remoción. No obstante al igual que en los experimentos realizados con el biomaterial en forma natural, al aumentar la concentración del analito, los porcentajes de remoción disminuyen un poco. Esto se puede apreciar en el valor máximo de remoción alcanzado para una concentración de 5 mgL<sup>-1</sup> que fue del 80 % y para una concentración de 20 mgL<sup>-1</sup> el porcentaje alcanzado fue casi del 70 %.

Este comportamiento fue casi igual para las concentraciones de 30, 40 50 y 60 mgL<sup>-1</sup>, es decir a los 5 minutos de contacto se alcanza casi el mayor valor de porcentaje de remoción y posteriormente los valores cambian muy poco, esto nuevamente corrobora que los sitios activos o disponibles donde se lleva a cabo la adsorción son ocupados rápidamente, esto se muestra en la Figura 5.10.

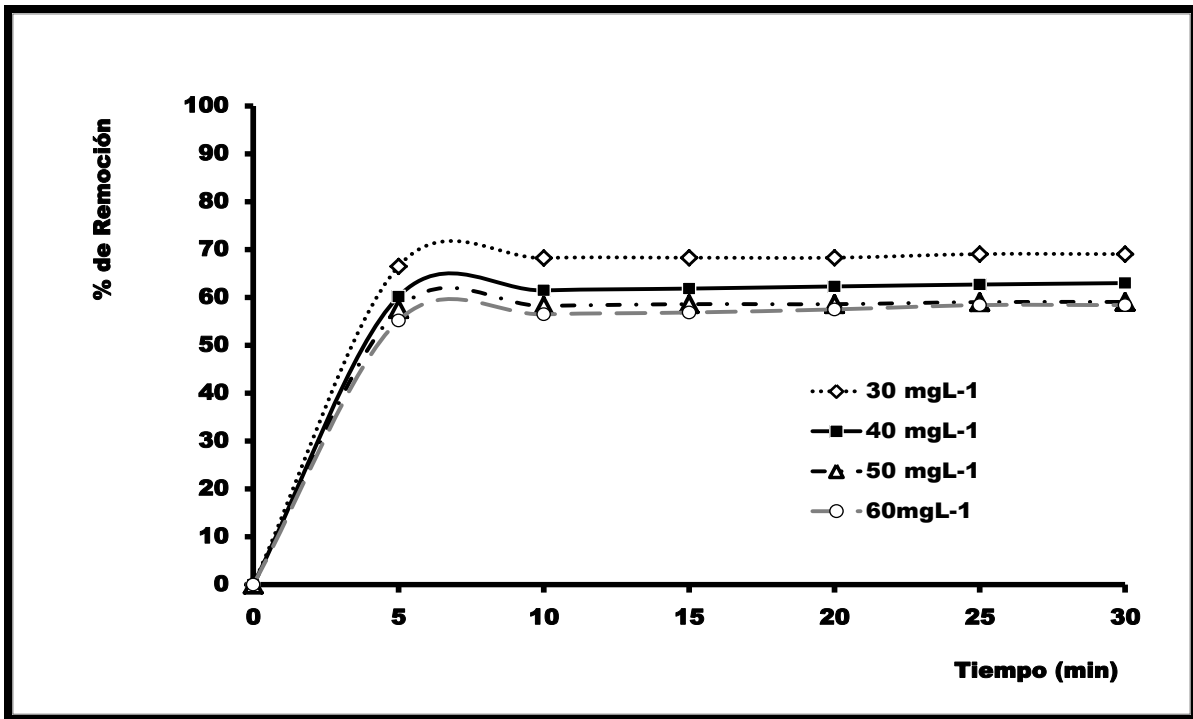


Figura 5.10.- Porcentaje de remoción para las concentraciones de 30, 40, 50 y 60 mgL<sup>-1</sup>, para biomaterial tratado químicamente. Fuente: propia del autor, 2014.

#### 5.4.- Isotermas de adsorción

Como el biomaterial fue manejado de dos maneras distintas se calcularon las correspondientes isotermas de adsorción, para ambos tipos de experimentación, por lo cual se consideraron las variables  $C_e$  y  $q_e$ . Por esta razón se muestran las isotermas de Langmuir y Freundlich para una biomasa de manera natural y con un tratamiento químico. Los valores se muestran en las Tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7.

**Tabla 5.4. Isotherma de Langmuir del biomaterial de manera natural**

Concentración ppm Cd (II)	Langmuir	
	Ce (mgL-1)	qe (mgg-1)
0	0	0
5	1.635	0.3365
10	3.47	0.653
20	7.28	1.272
30	11.265	1.8735
40	17.49	2.25
50	25.45	2.455
60	31.14	2.886

**Fuente: Propia del autor, 2014**

**Tabla 5.5. Isotherma de Freundlich del biomaterial de manera natural**

Concentración ppm Cd (II)	Freundlich	
	Log Ce	Log qe
0	0	0
5	0.2135	-0.473
10	0.54	-0.185
20	0.8621	0.1044
30	1.051	0.2726
40	1.242	0.3521
50	1.4056	0.39
60	1.4933	0.4602

**Fuente: Propia del autor, 2014**

**Tabla 5.6. Isotherma de Langmuir del biomaterial tratado químicamente**

<b>Concentración ppm Cd (II)</b>	<b>Langmuir</b>	
	<b>Ce (mgL-1)</b>	<b>qe (mgg-1)</b>
5	1.08	0.392
10	2.47	0.753
20	6.188	1.38
30	9.282	2.071
40	14.92	2.508
50	20.48	2.95
60	24.96	3.5

**Fuente: Propia del Autor, 2014**

**Tabla 5.7. Isotherma de Freundlich del biomaterial tratado químicamente**

<b>Concentración ppm Cd (II)</b>	<b>Freundlich</b>	
	<b>Log Ce</b>	<b>Log qe</b>
5	0.0334	-0.406
10	0.392	-0.123
20	0.791	0.1398
30	0.9676	0.3161
40	1.173	0.3993
50	1.311	0.469
60	1.397	0.544

**Fuente: Propia del Autor, 2014**

De estas Tablas se realizaron las siguientes gráficas, en cada una de ellas se linealizaron los valores, y se generaron las ecuaciones de la recta y los correspondientes coeficientes de correlación, esto se muestra en la Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14.

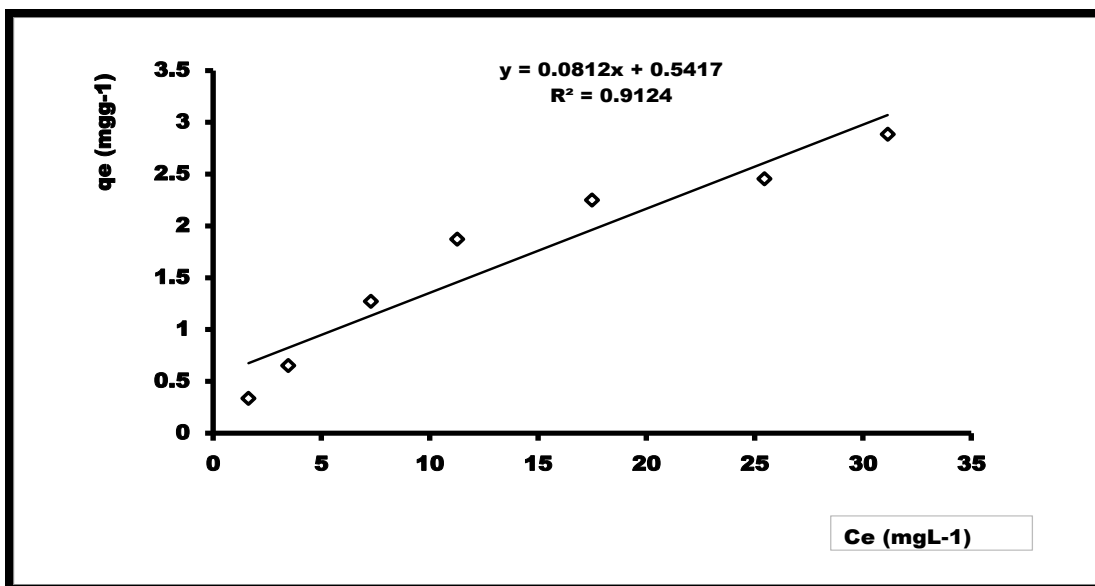


Figura 5.11. Isotherma de Langmuir para el biomaterial de manera natural. Fuente: propia del autor, 2014.

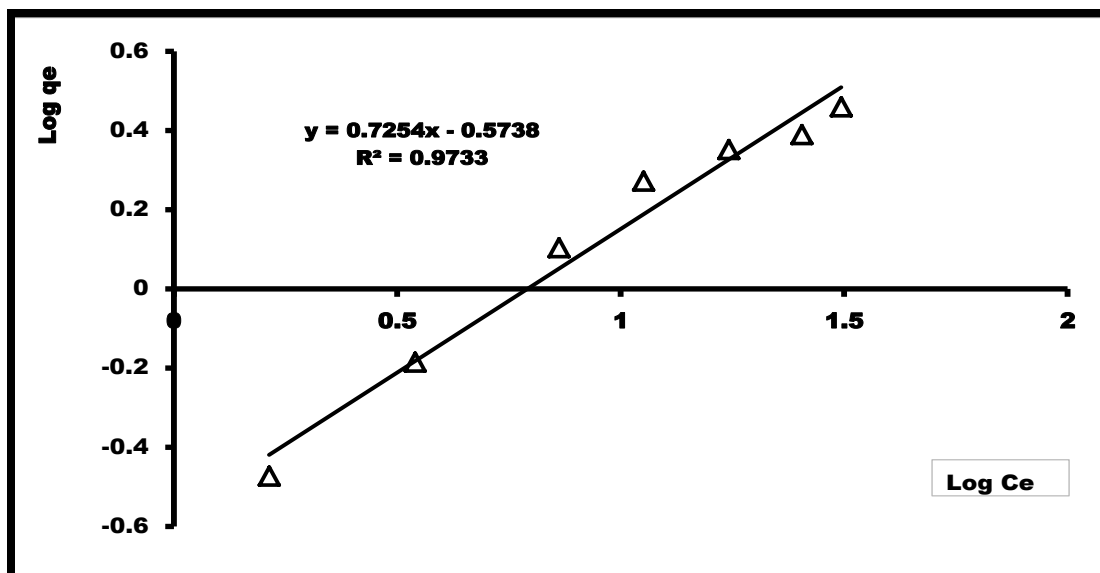


Figura 5.12. Isotherma de Freundlich para el biomaterial de manera natural. Fuente: propia del autor, 2014.

Como puede apreciarse en las Figuras 5.11 y 5.12, en ambas se genera la ecuación de la recta, así como el coeficiente de correlación. En ambas isothermas la recta de la ecuación tiene una tendencia positiva, no obstante para dilucidar cuál es el mejor modelo que se ajusta al proceso de adsorción fue necesario tomar como base el resultado del coeficiente de correlación.

El mejor resultado del coeficiente de correlación se observó en la isoterma de Freundlich, esto indica que el cadmio se adsorbe sobre el biomaterial manipulado de manera natural, en forma de monocapa. Pero acorde a lo que señala Freundlich, la superficie del biomaterial es heterogénea.

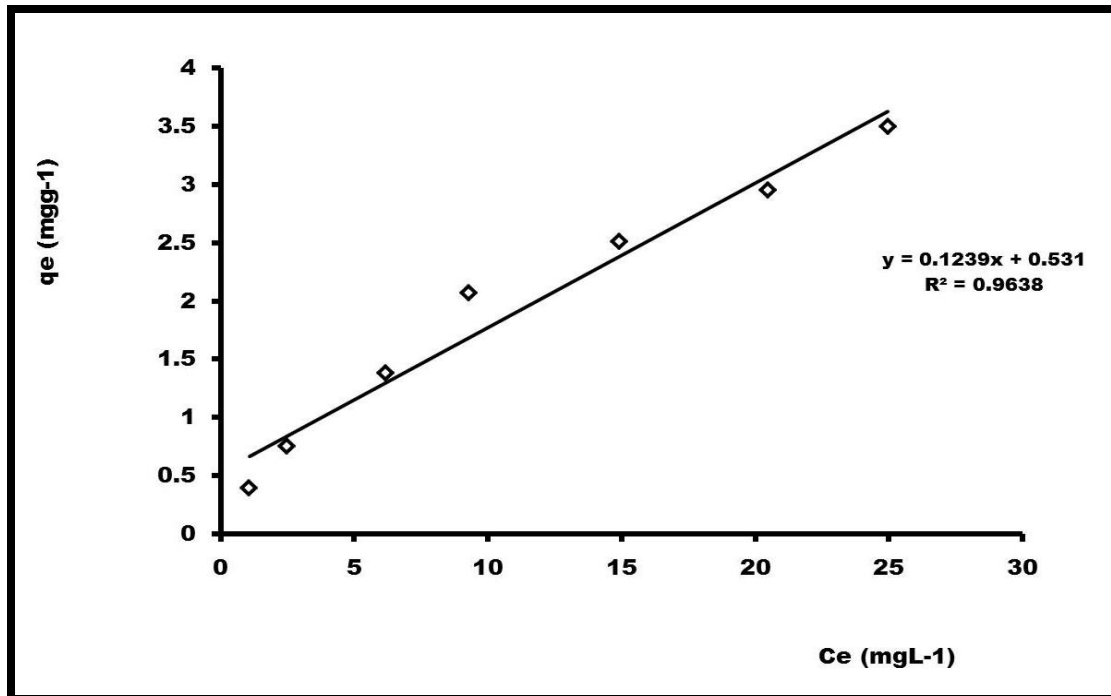


Figura 5.13. Isoterma de Langmuir para el biomaterial con tratamiento químico. Fuente: propia del autor, 2014

En la Figura 5.13 se observa que la ecuación de la recta en la isoterma de Langmuir también tiene una tendencia positiva, pero si observamos el coeficiente de correlación este mejora notablemente en relación a la misma isoterma pero con el biomaterial manipulado de manera natural. Esto podría dar indicar que la adsorción tiene mejor funcionalidad en el biomaterial tratado químicamente, ya

que como se dijo anteriormente con este tratamiento aumenta la porosidad de la biomasa y por consecuencia aumentan los sitios disponibles donde se lleva a cabo la adsorción del Cadmio. La interpretación de la isoterma indica que dé inicio el Cadmio se adsorbe sobre la superficie formando una monocapa, además que la toda la superficie del biomaterial presenta una homogeneidad de poros, es decir todos los poros son iguales entre sí.

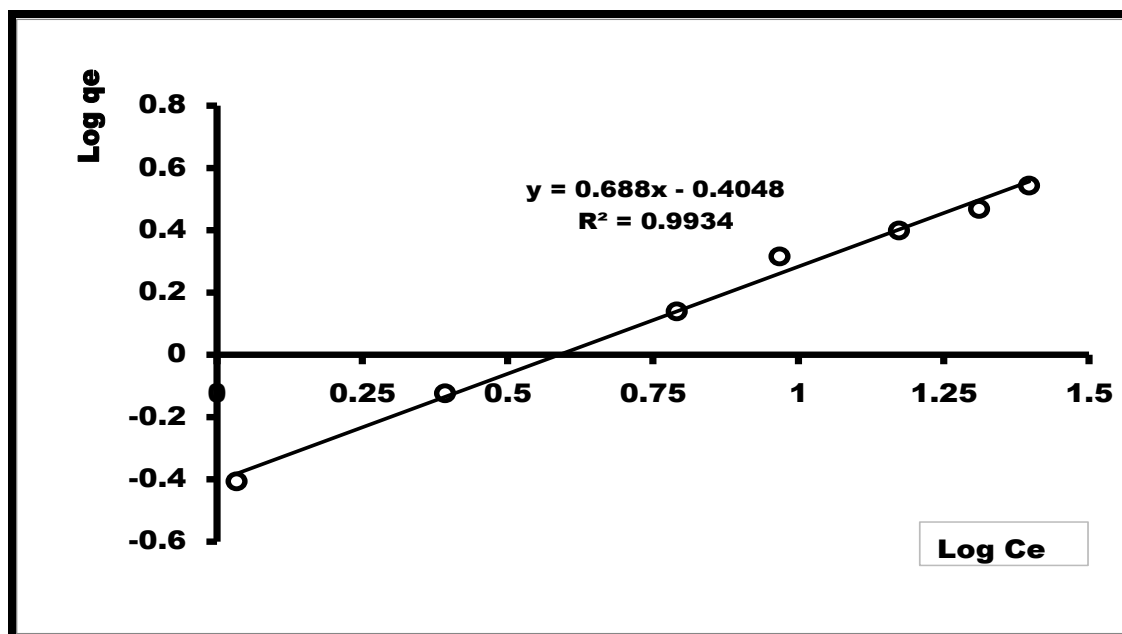


Figura 5.14. Isoterma de Freundlich para el biomaterial con tratamiento químico. Fuente: propia del autor, 2014.

En las Figuras 5.14 se muestra la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación. De estos resultados, específicamente el coeficiente, se detecta que la adsorción es todavía más eficiente ya que el valor es casi igual a la unidad, esto se interpreta que hay una correlación directamente proporcional entre el analito y la superficie del biomaterial. Por lo cual se establece que para el biomaterial tratado químicamente la adsorción se ajusta al modelo de Freundlich, donde se señala que el analito se adhiere a la superficie en forma de monocapa pero la superficie es totalmente heterogénea.

Finalmente se realizó una comparación de los dos tipos de experimentación y se estableció que el comportamiento de la adsorción del Cadmio se realizó en forma de monocapa en el biomaterial tratado químicamente y que la superficie es heterogénea. Esto se establece con base en los coeficientes de correlación de las cuatro isotermas, ya que de la comparación de los valores de los coeficientes mostraron los mejores resultados en la biomasa tratada con ácido sulfúrico. Esto también se corrobora con los porcentajes de remoción alcanzados y reportados previamente.

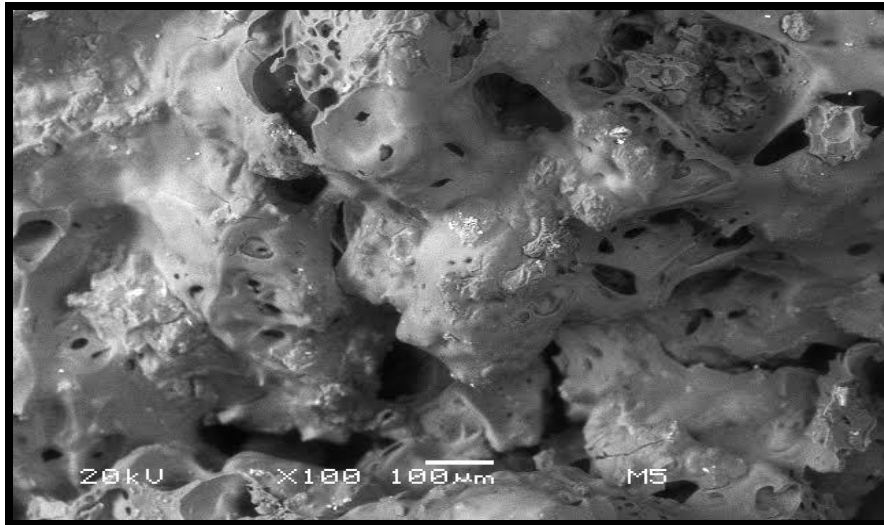
Por lo cual se establece que el tratamiento que se le dé al biomaterial va a tener una fuerte influencia sobre los porcentajes de remoción, así como en el comportamiento de la adsorción del analito sobre el biomaterial.

#### **5.5.- Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) después del contacto.**

Una vez realizado los contactos y después de haber calculado los porcentajes de remoción e isotermas, se realizó nuevamente la microscopia electrónica de barrido a fin de corroborar la presencia del cadmio sobre las superficies de los dos tipos de biomaterial. Esto se muestra en la Figuras 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18. Se enfatiza nuevamente que las microscopias mostradas son representativas, y corresponden a las dos tipos de biomateriales que se colocaron con la solución de concentración de  $40 \text{ mgL}^{-1}$  de Cd (II). La razón por la cual no se obtuvieron más microscopias y microanálisis se debe a la demanda que existe por el microscopio electrónico que se sitúa en el instituto nacional de investigaciones nucleares.

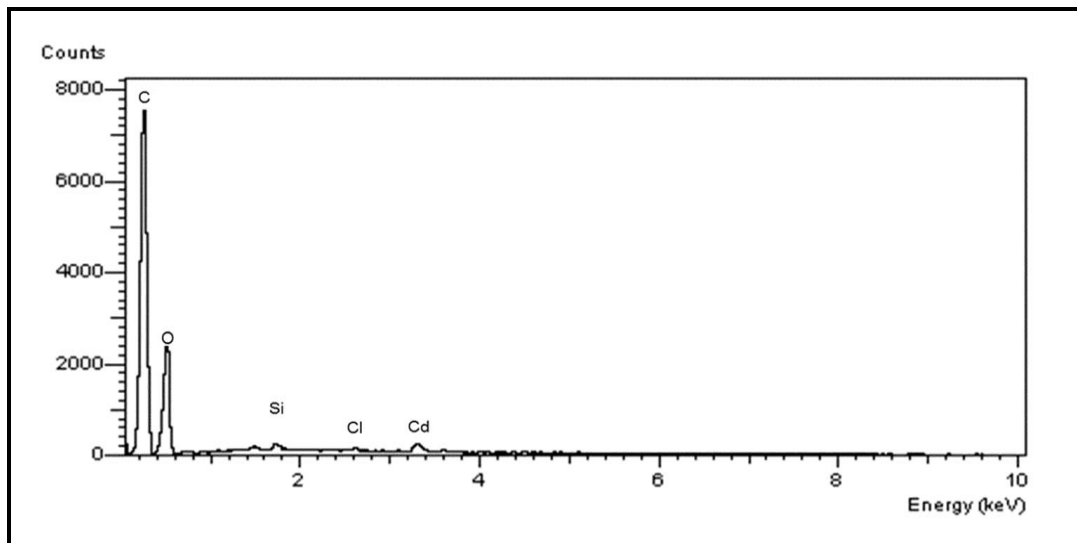
No obstante los resultados sirvieron para corroborar lo que se ha mostrado en los puntos desarrollados en esta sección de resultados en cuanto a la adsorción del Cadmio.





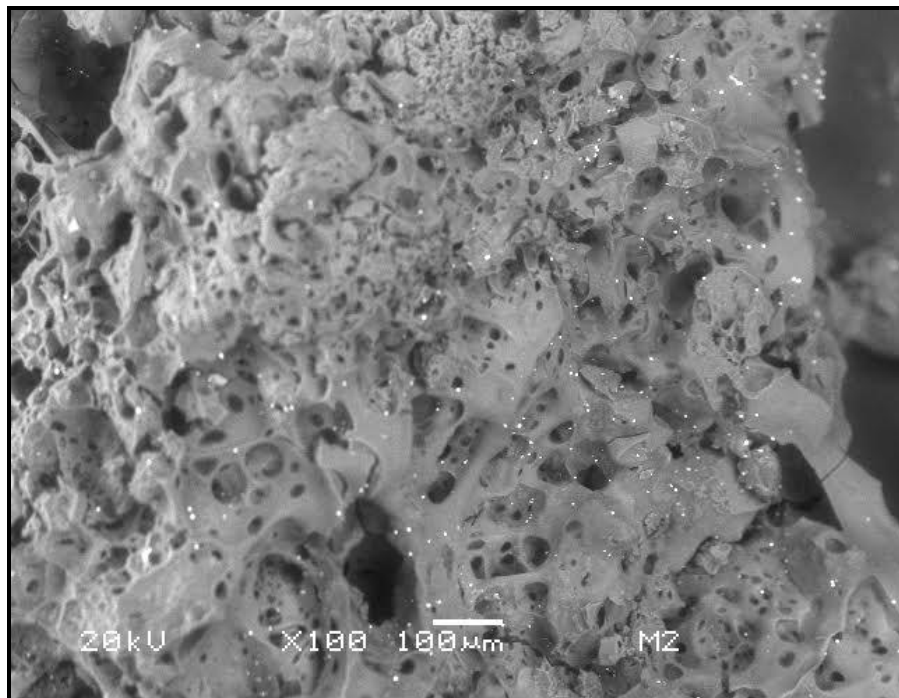
**Figura 5.15** Microscopia del biomaterial de manera natural después del contacto. Fuente: Propia del autor, 2014.

En la Figura 5.15 se muestra la microscopia del biomaterial de manera natural, esta microscopia se realizó en un aumento de 100X. Se puede apreciar el material poroso, posee formas irregulares en forma de hojas en secciones centrales. Asimismo se aprecia superficies lisas, que ocupan grandes regiones del área que se presenta en esta microscopia de barrido.



**Figura 5.16.** Microanálisis del biomaterial de manera natural después del contacto. Fuente: Propia del autor. 2014

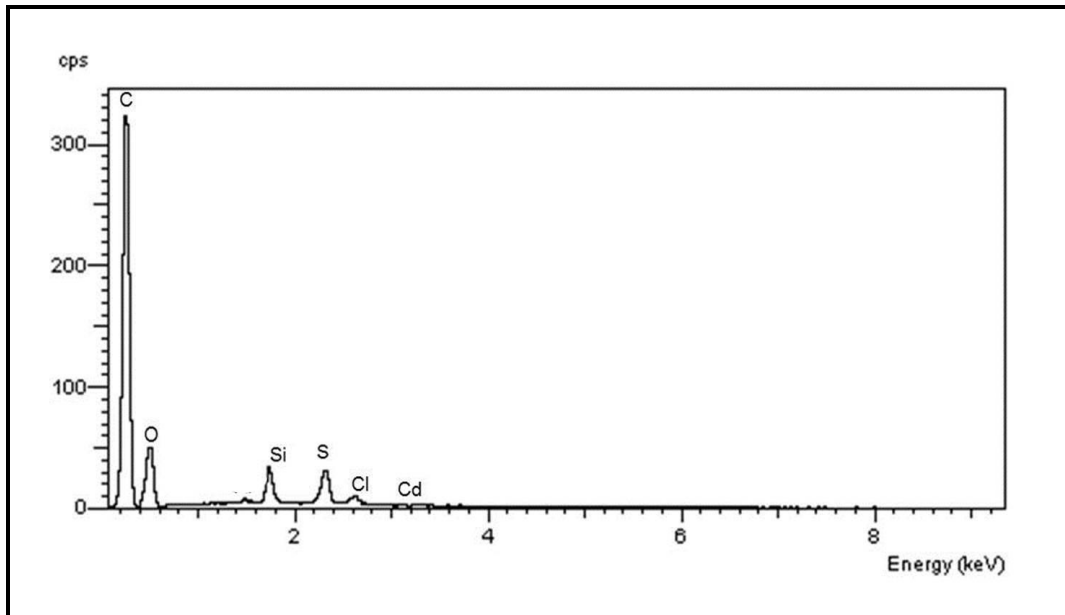
En la Figura 5.16 se muestra el microanálisis del biomaterial que estuvo en contacto con la solución de Cadmio, que como se señaló, corresponde a una concentración de  $40 \text{ mgL}^{-1}$ . Se puede apreciar que el componente del Carbono sigue predominando, aparecen el Oxígeno, Silicio, Cloro y lo importante es el Cadmio. Con esto se corrobora la adsorción de este ion sobre la superficie del biomaterial. Se debe enfatizar que esta microscopia no indica que toda la superficie de la muestra analizada tenga la misma proporción, sino que en un punto de la muestra analizada y solamente en ese lugar donde se lleva a cabo el bombardeo de electrones por parte del microscopio electrónico se presenta esta proporción de elementos detectados.



**Figura 5.17. Microscopia del biomaterial con tratamiento químico, después del contacto. Fuente: propia del autor, 2014.**

En la Figura 5.17 se muestra la microscopia de barrido del biomaterial que fue tratado con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , como se ha señalado este ácido es fuertemente oxidante, por lo cual se puede apreciar que la superficie contiene gran cantidad de poros de distintos tamaños, por así decirlo los diámetros son heterogéneos. Lo anterior se

debe a la oxidación que sufrió el biomaterial de *Musa cavendishii*, L. Esto corrobora la propuesta que la adsorción del Cadmio se lleva a cabo en una superficie heterogénea, tal como lo indica Freundlich en su modelo teórico.



**Figura 5.18. Microanálisis del biomaterial con tratamiento químico, después del contacto.**  
Fuente: Propia del autor. 2014

La Figura 5.18 muestra el microanálisis del biomaterial que tuvo el tratamiento con el ácido sulfúrico, esto se corrobora con la presencia del Azufre (s) que aparece en dicho espectro. Por otro lado se detecta la presencia del analito en estudio que es el Cadmio, como puede apreciarse la presencia es muy pequeña, aunque el principio teórico señala que las alturas de los picos con proporcionales a la concentración del elemento detectado, de nuevo se señala que esta proporción encontrada no es homogénea en toda la superficie de la muestra con la que se trabajó con el microscopio electrónico, sino solamente es un punto en el cual se analizó de manera detallada, si se hubiera analizado otra área de la muestra quizá el pico correspondiente al cadmio sería más alto.

No obstante su presencia el este microanálisis indica que el Cadmio fue adsorbido por el biomaterial tratado con el ácido sulfúrico.

## **CAPITULO VI**

### **Conclusiones**

Al término de la investigación se establecieron las siguientes conclusiones:

- La etapa de pretratamiento fue determinante en la generación de resultados en cuanto a los porcentajes de remoción. Ya que como se comprobó los mejores resultados se obtuvieron en el biomaterial que fue tratado químicamente.
- El tratamiento químico implicó realizar una oxidación con el ácido sulfúrico, que es un reactivo altamente oxidante. La razón por la cual se empleó este ácido fue por su disponibilidad en el laboratorio, no obstante este proceso puede realizarse con otro ácido que tenga la misma característica oxidante como son el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ) etc.
- La oxidación de la superficie del biomaterial, es determinante en el proceso de adsorción, ya que ésta actividad provocó que la porosidad del biomaterial aumentara por lo cual los porcentajes de remoción del Cadmio fueron más altos en el biomaterial que fue oxidado químicamente.
- En el proceso de adsorción, los cinco primeros minutos son determinantes, ya que en este intervalo de tiempo se alcanza la mayor parte de la concentración de los iones Cadmio a ser adsorbidos por los biomateriales, esto significa que la mayor cantidad de sitios disponibles son ocupados rápidamente.
- El comportamiento observado en los dos tipos de experimentación fue el mismo, es decir, cuando la concentración del analito es baja, se obtienen los mejores resultados en cuanto a los porcentajes de remoción. Cuando la concentración del analito aumenta en la fase acuosa los porcentajes disminuyen en esa misma proporción.
- En los dos tipos de experimentación la adsorción se ajusta al modelo de Freundlich, la cual indica que el adsorbato forma una monocapa, sobre una superficie heterogénea. Esto se corroboró comparando los coeficientes de correlación entre los dos tipos de isothermas calculadas.

- En términos generales la adsorción del Cadmio empleando el biomaterial *Musa cavendishii*, L. generó los mejores porcentajes de remoción Cadmio, ya que el tratamiento químico de la biomasa fue determinante en el proceso de adsorción.
  
- La técnica complementaria del microscopio electrónico, fue decisiva en cuanto a la comprobación de la presencia del Cadmio sobre los biomateriales que se emplearon. Como se pudo constatar los microanálisis mostraron claramente su presencia. Si bien en los espectros generados el pico correspondiente al Cadmio no muestra una altura considerable, hay que recordar que solamente se está analizando un solo punto de la muestra que se introdujo dentro del microscopio. Y por lo tanto esto no significa que estos resultados tengan la misma proporción de componentes en toda la superficie de la muestra.
  
- Si bien los resultados de adsorción no fueron los esperados en cuanto a alcanzar casi el 95%. Si se recomienda que este tratamiento se emplee a manera de pulimiento, es decir que el agua contaminada que haya sido tratada previamente se le aplique este procedimiento a fin de remover la concentración remanente del contaminante disuelto en fase acuosa.

## Bibliografía

- Aretxaga Aitor, Sylvia Romero, Montserrat Sarra and Teresa Vicent (2001) Adsorption Step in the Biological Degradation of a Textile Dye. *Biotechnol Prog.* 17, 664-668.
- Barrera-González Héctor (2005) Remoción de Cr(VI) y Cr(III) en Soluciones Acuáticas por *Ectodermis de Opuntia*. Tesis de Maestría. Facultad de Química. UAEM. pp.35
- Bousher, Andrew, Xiaodong Shen and Robert G. Edyvean (1997) Removal of Coloured Organic Matter by Adsorption onto low-cost Waste Materials. *Water Research.* 31, 2084-2092.
- Chang J., Law R. and C. Chang (1997) Biosorption of lead, copper and cadmium by biomass of *Pseudomonas aeruginosa* PU21. *Water Research.* 31(78) 1651-1658
- Dakiky M., Khamis M., Manassra A. and M. Mer'be (2002) Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents. *Advances in Environmental Research.* 6, 533-540.
- Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, The University of Western Ontario, 1151 Richmond St. N, London, Ontario N6A 5B9, Canada Hardiljeet K. Boparai, Meera Joseph, Denis M. O'Carroll.
- Department of Chemical Engineering, Hacettepe University, 06532 Beytepe, Ankara, Turkey Department of Biology, Ankara University, Ankara, Turkey. Z. Aksu, G. Doğanmez

- Environmental Monitoring and Research Laboratories, Department of Applied Chemistry, Institute of Technology, Banaras Hindu University, Varanasi 221005, India, Y.C. Sharma
- Gupta V. K. and J. D.Faull. (2001) Selective guest-host association on selfassembled monolayers of calix[4]resorcinarene. *Langmuir* 17:1470-1476.
- Hussein H., S. F. Ibrahim , K. Kandeel and H. Moawad (2004) Biosorption of heavy metals from waste water using *Pseudomonas* sp. *Environmental Biotechnology*. (7), 1, 1023-1027.
- Nasernejad B., Esslam Z. T., Bonakdar P.B., Esmaail B. M. and A.Zamani (2005) Comparison for biosorption modeling of heavy metals (Cr(III)., Cu(II), Zn(II)) adsorption from wastewater by carrot residues. *Process Biochemistry*. 40, 1319-1322.
- Qingbiao Li, Songtao Wu, Gang Liu, Xinkai Liao, Xu Deng, Daohua Sun, Yuelin Hu and Yili Huang(2004 )Simultaneous biosorption of cadmium (II) and lead (II) ions by pretreated biomass of *Phanerochaete chrysosporium*. *Separation and Purification Technology*, 34 pp. 135-142
- Quivera, Vol. 10, Núm. 1, enero-junio, 2008, pp. 16-31. ISSN (Versión impresa): 1405-8626 Universidad Autónoma del Estado de México. Campos Medina, Eduardo
- Ramakrishna K. R. and T. Viraraghavan (1995) Dye removal using low cost adsorbents. *Wat. Sc. Tech.* 36, 189-196
- Romero-Gonzales J., Peralta-Videa J. R., Rodríguez E., Ramírez S. L. and J. L. Gardea-Torresdey (2005) Determination of Thermodynamic parameters of



Cr(VI) adsorption from aqueous solution onto Agave lechugilla biomass. *J.Chem. Thermodynamics*. 37, 343-347

- Schiewer, S. and B., Volesky (1995) Modeling of proton. *Environ. Sci.Technol.* 3049-58
- Tsezos M. and M. Keller (1983) Adsorption of Ra226 by biological origin adsorbents. *Biotechnology and Bioengineering*. 25, 201-215
- VOLESKY, B (a). (1999) Biosorption of Cd and Cu by different types of Sargassum biomass. In: AMILS, R. and BALLESTER, A. eds. Biohydrometallurgy and the Environment towards the mining of 21st century (part B): *International Biohydrometallurgy Symposium-Proceedings*. Amsterdam, Elsevier. pp. 473-482.
- VOLESKY, B (b). Removal and recovery of heavy metals by biosorption. In: *Biosorption of heavy metals*. Boston, USA, CRC press, 1990b. , p. 7-43.
- Wesley M. Jarrell. and Timothy D. Mayer (2000). Phosphorus sorption during iron (II) oxidation in the presence of dissolved silica. *Water. Research*. 34:3949 – 3956.
- W.S.W. Ngah, C.S. Endud, R. Mayanar, Removal of copper(II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads, *React. Funct. Polym.* 50 (2002) 181–190.
- V.K. Gupta, Equilibrium uptake sorption, dynamics process, development, column operations for the removal of copper and nickel from aqueous solution and wastewater using activated slag, a low-cost adsorbent, *Ind. Eng. Chem. Res.* 37 1 (1998) 192–202.

- L. Jin, R. Bai, Mechanisms of lead adsorption on chitosan/PVA hydrogel beads, *Langmuir* 18 (2002) 9765–9770.
- Millán C. E. (2008) Remoción de cadmio (II) y plomo (II) en soluciones acuosas usando *Citrus limonum* sp. Como biosorbente. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales.
- Sánchez P. O. (2004). Estudio de la capacidad de sorción del alginato de calcio en la remoción de Cr (III) en competencia con Fe (III) presentes en soluciones acuosas. Tesis Ingeniería Química. UAEM.
- Buseti, F., Badoer S., Cuomo M., Rubino B., Traverso P. (2005). Occurrence and Removal of Potentially Toxic Metals and Heavy Metals in the Wastewater Treatment Plant of Fusina, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 44, 9264-9272.
- Chen Y.N., Chai L.Y., Shu Y.D. (2008). Study of Arsenic(V) adsorption on bone char from aqueous solution, *Journal of Hazardous Materials* 160, 168–172.
- Choksi P.M., Joshi V.Y., (2007). Adsorption kinetic study for the removal of Nickel(II) and Aluminum(III) from an aqueous solution by natural adsorbents, *Desalination*, 208 216–231.
- Hidalgo-Vázquez, A.R., R. Alfaro-Cevas-Villanueva, L. Márquez-Benavides, R. Cortés-Martínez (2011). Cadmium and Lead Removal from Aqueous Solutions Using Pine Sawdust as Biosorbent. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*. 6, 447-462.
- Min, S.H., J.S. Han, E.W. Shin, J.K. Park (2004). Improvement of cadmium ion removal by base treatment of juniper fiber. *Water Research* 38, 1289–1295.

- Ramos Yánac, Karim, Abel Navarro Aliaga, Lily Chang Fang, Holder Maldonado García (2004). Evaluación de Nuevos Biosorbentes para la Remoción de Cadmio (II): Estructura vs Capacidad de Adsorción. Revista de la Sociedad Química del Perú. 70, 136-146.
- García-Rojas, Norma; Villanueva-Díaz, Paola; Campos-Medina, Eduardo; Velázquez-Rodríguez, Alma. Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. Quivera, vol. 14, núm. 1, enero-junio, 2012, pp. 109-129.
- Tomado de Tejeda y col. Planta Piloto de Fermentaciones, Departamento de Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana, 1995.
- Julio Gil, Silvana Muratona, Paola Yacanto, Edgar M. Soteras, Clidia Abaca, María G. Sustersic. Universidad Nacional de San Luis, Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico-Sociales,. 25 de Mayo 384, 5730 Villa Mercedes, San Luis – Argentina. 2012
- Oliva Primera-Pedrozo, Fredy Colpas-Castillo, Edgardo Meza-Fuentes2, Roberto Fernández-Maestre Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. 2008
- BULUT, Y., BAYSAL, Z. Removal of Pb(II) from wastewater using wheat bran. Journal of Environmental Management. No.78 (2006), p.107-113.
- E. Reynel-Avila a, A. Bonilla-Petriciolet, A.L. Martínez-Hernández, C. Velasco-Santos, J. Soto-Bernal. Remoción de cadmio en soluciones acuosas utilizando fibra de pluma de pollo. 2008.
- G. Vázquez, J. González-Álvarez, S. Freire y G. Antorrena. Desarrollo de un adsorbente basado en taninos de corteza de pinus pinaster. 2004.

- M.C. Basso, E.G. Cerrella, A.L. Cukierman. Remocion de cadmio (ii) de soluciones acuosas mediante carbon activado preparado a partir de caña. 2008.
- Donghee Park a, Seong-Rin Lim a, Yeoung-Sang Yun b, Jong Moon Park a. Reliable evidences that the removal mechanism of hexavalent chromium by natural biomaterials is adsorption-coupled reduction. 2007.
- Fla´vio Andre´ Pavan a, Ana Cristina Mazzocato, Yoshitaka Gushikem. Removal of methylene blue dye from aqueous solutions by adsorption using yellow passion fruit peel as adsorbent. 2007.
- Muhammad Saif Ur Rehman, Ilgook Kim, Jong-In Han. Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by sugar extracted spent rice biomass. 2012.
- B.H. Hameed, A.A. Ahmad. Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass. 2009.
- Muhammad Bilal, Jehanzeb Ali Shah, Tayyab Ashfaq, Syed Mubashar Hussain Gardazi, Adnan Ahmad Tahir, Arshid Pervez, Hajira Haroon, Qaisar Mahmood. Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater. 2013.
- Wen Huang, Zhi-min Liu. Biosorption of Cd(II)/Pb(II) from aqueous solution by biosurfactant-producing bacteria: Isotherm kinetic characteristic and mechanism studies. 2013.
- Eduardo Campos Medina, Ana Marcela Gómez Hinojos, Alma Velázquez Rodríguez. Estudio de la remoción del colorante azul de metileno empleando la biomasa de la Morinda Citrocifolia L. Quivera, vol. 13, núm. 2, julio-diciembre, 2011, pp. 52-62.

- Contreras, Raúl E.; Hernández, Israel; González, Ranulfo O.; García, Alfonso; Arriaga, María. Remoción de azul de metileno en medio acuoso mediante el uso de bagazo de caña de azúcar y rastrojo de maíz modificados con iones  $\text{SO}_4^{2-}$  Y  $\text{PO}_4^{3-}$  Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 4, núm. 1, enero-marzo, 2013, pp. 29-37
- Mahendra Kumar, Bijay P. Tripathi, Vinod K. Shahi. Crosslinked chitosan/polyvinyl alcohol blend beads for removal and recovery of Cd (II) from wastewater. 2009.
- Arup Roy, Jayanta Bhattacharya. A binary and ternary adsorption study of wastewater Cd(II), Ni(II) and Co(II) by  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  nanotubes. 2013.
- Ai Phing Lim, Ahmad Zaharin Aris. Continuous fixed-bed column study and adsorption modeling: Removal of cadmium (II) and lead (II) ions in aqueous solution by dead calcareous skeletons. 2014.
- [http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Lead\\_Cadmium/docs/submissions/ICdA%20Comments%20on%20UNEP%20March%202008%20Cadmium%20Review.pdf](http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Lead_Cadmium/docs/submissions/ICdA%20Comments%20on%20UNEP%20March%202008%20Cadmium%20Review.pdf). Fecha de consulta 20 Julio 2014.
- Andrew Bousher, Xiaodong Shen and Robert G. Edyvean (1997) Removal of Coloured Organic Matter by Adsorption onto low-cost Waste Materials Wat. Res. 31, 2084-2092.
- <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a13.pdf>. Fecha de consulta 20 Julio 2014
- <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2008/mcs2008.pdf>. Fecha de consulta 20 Julio 2014

- [www.agua.org.mx/index2.php?option=com\\_content&do](http://www.agua.org.mx/index2.php?option=com_content&do). Fecha de Consulta 25 Julio 2014
- <http://www.ine.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>. Fecha de Consulta 25 Julio 2014,
- <http://www.medioambiente.mx>. Fecha de Consulta 28 Julio 2014
- <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3694/1/55706-1.pdf>. Fecha de Consulta 28 Julio 2014
- <https://www.uam.es/docencia/elementos/spV21/sinmarcos/elementos/cd.html>. Fecha de Consulta 28 Julio 2014
- [http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema5.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf). Fecha de Consulta 28 Julio 2014
- [http://www.kodak.com/eknet/PageQuerier.jhtml?pq-locale=es\\_ES](http://www.kodak.com/eknet/PageQuerier.jhtml?pq-locale=es_ES). Fecha de Consulta 28 Julio 2014
- <https://camimex.org.mx>. Fecha de Consulta 28 Julio 2014
- <http://biologia.dgenp.unam.mx>. Fecha de Consulta 28 Julio 2014