



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

**Evaluación del helecho *Pteridium aquilinum* como biosorbente para la adsorción de plomo (Pb) en agua.**

---

**TESIS**  
Para obtener el grado de  
**Ingeniero Ambiental**

**PRESENTA**  
**María Elisa Mercader Valencia**

**DIRECTOR DE TESIS**  
**Dra. Norma Angélica Oropeza García**

**ASESORES**  
**Dr. Víctor Hugo Delgado Blas**  
**Q.F.B. José Luis Gonzáles Bucio**  
**Dr. José Manuel Carrión Jiménez**  
**Dr. Carlos Alberto Niño Torres**





**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**Evaluación del helecho *Pteridium aquilinum* como biosorbente para la adsorción de plomo (Pb) en agua.**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**COMITÉ DE TESIS**

**DIRECTOR:**

**Dra. Norma Angélica Oropeza García**

**ASESOR:**

**Dr. Víctor Hugo Delgado Blas**

**ASESOR:**

**Q.F.B. José Luis González Bucio**



## ÍNDICE

Resumen .....	1
Introducción.....	2
Justificación .....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Planteamiento del Problema.....	4
Antecedentes.....	5

### CAPÍTULO 1 BIOSORBENTES

1.1 Definición de Biosorbente.....	4
1.2 Características.....	5
1.3 Mecanismos de la Biosorción.....	6
1.4 Técnicas analíticas en los estudios de sorción.....	7
1.5 Ventajas y Desventajas.....	10
1.6 Aprovechamiento.....	15

### CAPÍTULO 2 HELECHOS

2.1 Definición del genero Pteridium.....	19
2.2 Tipos de Pteridium y distribución geográfica.....	20
2.3 <i>Pteridium Caudatum</i> (L.) Maxon.....	20
2.4 <i>Pteridium Arachnoideum</i> (Kaulf.) Maxon.....	21
2.5 <i>Pteridium Aquilinum</i> (L.) Kunh.....	21
2.6 Problemática agrícola.....	22
2.7 El helecho <i>Pteridium aquilinum</i> y la salud.....	24
2.8 Usos del Helecho PA.....	26
2.9 Métodos de control.....	26

### CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Características con Respecto a la Afinidad.....	28
3.2 Características Respecto al Origen.....	39
3.3 Área de toma de muestras.....	30
3.4 Información obtenida del área de toma de muestras.....	31
3.5 Muestreos.....	31
3.6 Procedimiento experimental.....	32
3.7 Proceso.....	32
3.8 Observaciones.....	33

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Resultados.....	36
4.2 Análisis de resultados.....	37
4.3 Discusión.....	41

## **CAPÍTULO 5**

Conclusiones y recomendaciones .....	43
--------------------------------------	----

## **ANEXOS**

Anexo A .....	45
El plomo en la industria.....	45
Niveles de plomo en sangre en distintos grupos de población por país.....	46
Listado de fuentes en México.....	47
Tratamientos para la descontaminación de plomo.....	51
Métodos de recuperación del material.....	54
Anexo B.....	57
Caracterización del área de estudio.....	57
Anexo fotográfico.....	64
Grupos funcionales.....	66
Otros tratamientos adsorbentes en efluentes industriales.....	67
<b>Bibliografía y Referencias.....</b>	<b>69</b>

# **“Evaluación del helecho *Pteridium aquilinum* como biosorbente para la adsorción de plomo (Pb) en agua.”**

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se investigó la biosorción de plomo por biomasa del helecho común (*Pteridium aquilinum kunh*), triturado, sin tratamiento de protonación. El objetivo general fue realizar una investigación exploratoria con el fin de evaluar la capacidad de biosorción del helecho común para la eliminación de metales pesados y el porcentaje de remoción de dichos metales. Se variaron 3 parámetros fisicoquímicos (tamaño de partícula de la biomasa, concentración del contaminante – metal, y tiempo de contacto), la investigación se dividió en dos etapas: La primera etapa consistió en dos experimentos asignando 5 horas de tiempo de contacto, variando la concentración (60.8032µg/ml y 863.7647µg/ml). La segunda etapa se prepararon dos concentraciones distintas (73.2842µg/ml y 111.7159µg/ml), variando el tiempo de contacto (1 hora 30 minutos, 3 horas 20 minutos y 7 horas), se hicieron tres repeticiones por concentración. Como resultado de las variaciones de los parámetros se generaron 8 experimentos diferentes.

De los 8 experimentos, se encontró que el experimento con mayor eficiencia de adsorción en relación a la concentración fue el CB2 (Eficiencia de adsorción: 170.24 mg/g, T= 5 horas, %R= 98.55, CInicial (Pb µg/ml) = 863.7647, CFinal (Pb µg/ml) = 12.5561 ). El Segundo experimento de mayor eficiencia en relación a la concentración fue CB3 (Eficiencia de adsorción: 13.7838, T= 3 horas 20 minutos, %R= 94.05, CInicial (Pb µg/ml) =73.2842, CFinal (Pb µg/ml) = 4.3650 ). La eficiencia ideal de sorción se sitúa entre las 5 y las 3 horas 20 minutos de contacto. La eficiencia del biomaterial ha demostrado que no se necesita preparación química previa para su uso como biosorbente, por lo que el costo de inversión es bajo y el impacto al ambiente es menor.

Palabras clave: biosorción, biomasa, adsorción, remoción, capacidad de biosorción.

## Introducción:

El helecho común (*Pteridium aquilinum kunh*) es una especie cosmopolita que se encuentra en las zonas tropicales y templadas. Es una planta antigua que pertenece a la división *Pteridophyta* que incluye 10,000 especies de helechos. Crece en laderas, colinas en suelos ricos con poca humedad, y en suelos que han sido alterados por el hombre (Fitzsimmons y Burrill 1993; Geary, 2004; SEMARNAT, 2004). Su presencia representa un peligro para el futuro del campo mexicano, en especial para los agricultores que viven de la siembra de hortalizas ya que este impide el paso de la luz solar y evita el crecimiento de nuevas plantas.

Durante los últimos 20 años las zonas de cultivo al sur de Quintana Roo se encuentran amenazadas por el helecho *Pteridium aquilinum kunh*. Las zonas de "helechales", como son conocidas localmente, están desplazando las áreas de cultivo hacia las zonas boscosas de los ejidos, por lo que las zonas ocupadas por este helecho quedan inhabilitadas para la práctica de cualquier actividad productiva.

La ingesta del Helecho Común ha sido asociada al cáncer de estómago y esófago en humanos, y se ha probado que produce hematuria bovina en el ganado (Pamakcu *et al*, 1978; Villolobos Salazar *et al*, 1990). Los suelos también se ven directamente afectados por la presencia de esta planta, Glass (1976) afirma que el helecho común produce ácidos fenólicos y los incorpora al suelo, lo cual provoca la reducción del crecimiento de raíces en las especies potencialmente competidoras. A simple vista es muy notoria la falta de biodiversidad vegetal que presentan las zonas contaminadas por helecho común.

Se han aplicado diferentes métodos de control de la especie *Pteridium aquilinum kunh*, según Macario (2011), la mayoría de estos métodos están dirigidos únicamente a la limpieza de áreas para la realización de actividades agropecuarias, sin embargo no se han propuesto alternativas de aprovechamiento para esta especie.

El fundamento de esta investigación fue encontrar una alternativa que sirviera para el aprovechamiento del helecho en las zonas de cultivo, hoy en día existen diversos

ejemplos de materiales de origen vegetal con usos biotecnológicos que tienen un papel importante en las industrias: minera, farmacéutica, energética, y alimentaria.

El uso de biomasa inerte tiene ventajas especialmente si el agua a tratar posee un alto contenido de sustancias tóxicas. Por lo que en el presente trabajo se propuso el aprovechamiento del helecho común como biosorbente de plomo en agua, ya que cumple con todas las cualidades de un biosorbente rentable, por ejemplo: Obtención de grandes cantidades de biomasa aprovechables a bajo costo, no se cultiva como alimento humano, su ingesta es causa de muerte en el ganado, es considerado una plaga, el aprovechamiento del biomaterial supondría una mejora para la siembra de hortalizas y la prevención de incendios en el campo Mexicano ya que es una especie que al secarse se incendia con facilidad.

**Justificación:**

Ante la invasión del helecho *Pteridium aquilinum kunh* que ocasiona la pérdida de áreas de cultivo en los campos quintanarroenses, generando una abundante cantidad de biomasa, a la cual no se le da uso y al secarse puede ocasionar incendios que deriven en la pérdida parcial o total de plantaciones destinadas al uso agrícola, el presente trabajo propone una alternativa de aprovechamiento como biosorbente para la bioadsorción de plomo en agua.

**Objetivo General:**

Probar la biomasa muerta seca del Helecho *Pteridium aquilinum (L.) kunh* como un biosorbente para Pb en agua.

**Objetivos Específicos:**

Determinar la capacidad de adsorción de Pb en la biomasa, en función del tiempo de contacto para obtener las condiciones de máxima adsorción.

Determinar la capacidad de adsorción de Pb en la biomasa, en función de la concentración para obtener las condiciones de máxima adsorción.

**Planteamiento del problema:**

El helecho común representa un peligro para el futuro de la agricultura del sureste Mexicano, con el fin de evitar la invasión, se propone una forma de aprovechamiento sustentable.

## **Antecedentes:**

La invasión de *Pteridium* representa un serio problema para la conservación y para los productores y administradores de recursos, pues retrasa la recuperación de la estructura y composición de los bosques y obstaculiza o, en el peor de los casos, imposibilita las labores agrícolas y forestales al obligar a los campesinos a abandonar sus tierras por la fuerte inversión inicial en mano de obra que requiere el abatimiento de la población de helechos, cuyos rizomas tallos subterráneos forman una densa red bajo el suelo que es extremadamente difícil de remover en su totalidad y prácticamente inmune a los herbicidas (Ramírez-Trejo *et al.* 2007).

Las investigaciones deberían emplear tipos de biomasa que son baratos, eficientes, fácil de crecer o cultivar. Asimismo, se debe aunar fuerzas para modificar estos biosorbentes o mejorar/alterar la configuración de bioreactores, así como las condiciones fisicoquímicas para favorecer la biosorción. Un biosorbente puede ser considerado de bajo costo si requiere poco procesamiento, es abundante en la naturaleza o si es un sub-producto o material de desecho de otra industria (Cuizano *et al.* 2009).

Con el propósito de encontrar mejores biosorbentes, se han investigado diferentes tipos de biomateriales, residuos agroindustriales tales como desechos de té y café (Orhan y Buyukgungor, 1993; Prabhakaran, 2009), cáscara de nuez (Cimino *et al.* 2000; Dakiky *et al.* 2002; Demirbas, 2003), cáscara de cacahuete (Johnson *et al.* 2002; Hashem *et al.*, 2005), cáscara de almendra (Dakiky *et al.* 2002), cáscara de plátano y cáscara de naranja (Annadurai *et al.* 2002), cascarilla de arroz (Nurul *et al.* 2006), fibras de lana (Balkose y Baltacioglu, 1992), hojas de cactus (Dakiky *et al.* (2002), mazorca de maíz modificada (Vaughan *et al.* 2002), bagazo de caña (Mata *et al.* 2009), pencas de nopal (Miretzky *et al.* 2007), entre otros.

En el caso específico de biomateriales para la adsorción de plomo en agua podemos encontrar los siguientes ejemplos:

Residuos de malta y agave (Liñán, Treviño *et al.* 2010), cáscara de naranja (Cardona-Gutiérrez, Cabañas *et al.* 2013), Kikuyo (Maldonado *et al.* 2012), levadura de cerveza (Gutiérrez Cerón *et al.* s.f), desechos de jardín doméstico (Larenas-Uría *et al.* 2008), carbón activado (Sun-Kou *et al.* 2014), cáscaras de ñame y bagazo de palma (Tejada *et al.* 2016), quitosán, Montmorillonita, zeolita, arcilla, turba, corcho, algas marinas, lana modificada y rapa de uva (Moreno-Rabasco, 2009).

# Capítulo 1. Biosorbentes

## 1.1 Definición de Biosorbente

Material biológico que tiene afinidad por contaminantes orgánicos e inorgánicos generando su eliminación en soluciones acuosas durante el proceso de biosorción; el mecanismo de remoción no está controlado por el metabolismo.

La Biosorción es una de las tecnologías mas prometedoras para la retirada de metales tóxicos de las aguas residuales ya que, al tratarse de un proceso con características únicas, lo convierte en una alternativa potencial a los procesos convencionales, entre otras cuestiones, porque es un proceso generalmente rápido y que resulta muy efectivo en la extracción de metales pesados a bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua.

El proceso de Biosorción implica una fase solida (biosorbente) y una fase liquida (disolvente: normalmente agua) que contiene las especies disueltas o suspendidas a ser absorbidas (sorbato). Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido (a una concentración final o en el equilibrio). La afinidad del sorbente por el sorbato determina su distribución entre las fases sólida y líquida. La calidad del sorbente está dada por la cantidad del sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada.

Los biomateriales utilizados en estos procesos actúan en tiempos cortos de contacto, generan efluentes de alta calidad, con la posibilidad de trabajar en un amplio rango de condiciones (García *et al.* 2010).

Los tipos de sustratos de origen biológico que se han estudiado para la preparación de biosorbentes incluyen la biomasa microbiana, algas marinas, residuos industriales, residuos agrícolas, residuos naturales y otros materiales (Park *et al.*, 2010; Dhankhar y Hooda, 20011).

## 1.2 Características

Los biosorbentes son materiales naturales disponibles en grandes cantidades, o ciertos productos residuales de operaciones industriales o agrícolas, que pueden ser utilizados con el fin de la captura de contaminantes, debido a su bajo costo (Vargas, 2010).

Un material para ser usado como biosorbente debe tener las siguientes características:

1. Tanto la captura como la liberación del metal o contaminante deben de ser rápidas y eficientes.
2. Debe de producirse a bajo costo y ser reutilizable.
3. Debe tener las características deseables de tamaño de partícula, forma y propiedades mecánicas.
4. Debe ser selectivo.
5. La desorción del metal o contaminante debe llevarse a cabo fácilmente y en forma económica.

### 1.3 Mecanismos de la Biosorción

Una vez que la biosorción se asocia exclusivamente a la captación pasiva de iones metálicos, puede ser excluido el mecanismo de transporte a través de la membrana celular que sólo tiene lugar con células vivas.

Para la fijación de metales pesados en la biosorción se han sugerido la retención o secuestro del metal en diferentes partes del biosorbente:

\* **Complejación o Quelación:** El metal se une a los centros activos de la pared celular mediante enlaces químicos formando determinados complejos.

\* **Adsorción Física:** Se incluyen aquí los fenómenos asociados a fuerzas de Van der Waals. En este caso la biosorción es rápida y reversible.

\* **Intercambio iónico:** Propio de los iones metálicos divalentes que se intercambian con iones propios de los polisacáridos presentes en la biomasa. El proceso también es rápido y reversible.

\* **Precipitación:** El mecanismo está asociado a la formación de un complejo en la pared celular que posteriormente es hidrolizado.

Generalmente se considera que en la biosorción de metales pesados pueden aparecer simultáneamente más de uno de los mecanismos señalados, siendo, en algunos casos, muy difícil de explicar el o los mecanismos que tienen lugar en un proceso de biosorción determinado (Col *et al.* 2001).

## 1.4 Técnicas analíticas en los estudios de biosorción

Espectrofotometría de absorción atómica (AAS)

Electrodos Selectivos de Iones (ISE)

UV-Vis

Valoración Potenciométrica

Microscopía electrónica de transmisión acoplada con espectrofotometría de rayos X de dispersión de energía (SEM/TEM-EDX)

Espectroscopia de infrarrojos o transformación de Fourier espectroscopia de infrarrojos (IR o FTR)

Espectroscopia de absorción de rayos X (XAS)

Difracción de Rayos X (XRD)

Espectroscopia de resonancia de espín de electrones (ESR)

Magnética nuclear de resonancia (RMN)

Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS)

Análisis termogravimétrico (TGA)

Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

**Tabla.1.4.1. Técnicas analíticas en los estudios de biosorción.**

<b>CLAVE</b>	<b>Estudio</b>	<b>Técnica</b>
<b>AAS</b>	Determina las concentraciones de sorbato en su fase acuosa.	Espectrofometría
<b>ICP</b>	Determina las concentraciones de sorbato en su fase acuosa.	Electrodos Selectivos de Iones. (ISE)
<b>SEM/TEM</b>	Visualización de la morfología del biosorbente. Composición elemental y distribución	Microscopía electrónica de transmisión acoplada con espectrofotometría de rayos X de dispersión de energía (SEM/TEM-EDX)
<b>TITRACIÓN</b>	Determina la cantidad y los sitios activos del biosorbente.	Valoración Potenciométrica

<b>ESR</b>	Determina los sitios activos del biosorbente	Espectroscopia de resonancia de espín de electrones.
<b>RMN</b>	Determina los sitios activos del biosorbente	Magnética nuclear de resonancia
<b>FTIR</b>	Determina los sitios activos del biosorbente	Espectroscopia de infrarrojos o transformación de Fourier espectroscopia de infrarrojos.
<b>DSC</b>	Informa la estabilidad termal del biosorbente	Calorimetría diferencial de barrido.
<b>TGA</b>	Informa la estabilidad termal del biosorbente.	Análisis termogravimétrico.

<b>XPS</b>	Determina la composición y el estado de oxidación de los elementos suspendidos en la superficie del biosorbente.	Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X
<b>XAS</b>	Determina el estado de oxidación y la relación entre el metal y el biosorbente.	Espectroscopia de absorción de rayos X
<b>XRD</b>	Informa sobre la estructura molecular y la estructura cristalina atómica del metal.	Difracción de Rayos X

Estas técnicas pueden complementarse entre sí para dar una visión de los mecanismos de biosorción (Park *et al.* 2010).

## 1.5 Ventajas y Desventajas

En los últimos años se ha diversificado la utilización de biomasa muerta o productos derivados de ella, ya que, además de eliminar el problema de la toxicidad, presenta ventajas económicas, tanto de mantenimiento como como evitando el suplemento de nutrientes. Sin embargo las células vivas pueden presentar una variedad mas amplia de mecanismos para la acumulación de metales. En la Tabla. 1.5.1 se recogen la principales ventajas y desventajas del empleo de biomasa inerte en comparación con células vivas para la eliminación de metales pesados.

**Tabla. 1.5. Comparación de las ventajas y desventajas de la biomasa viva vs biomasa muerta.**

<b>BIOMASA INERTE</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Independiente del crecimiento (biomasa muerta) y no sujeto a limitaciones por toxicidad. No necesita nutrientes en la solución de alimentación, deposición de nutrientes o productos metabólicos.</li> <li>2. Los procesos no están gobernados por limitaciones biológicas.</li> <li>3. La selección de la técnica de inmovilización no está gobernada por limitaciones de toxicidad o inactivación térmica.</li> <li>4. Son muy rápidos y eficientes en la retirada de metales; la biomasa se comporta como un intercambiador de iones.</li> <li>5. Los metales pueden ser liberados fácilmente y recuperados.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rápida saturación: cuando los sitios de interacción con el metal están ocupados, es necesario remover el metal antes de utilizarse nuevamente, sin importar su valor.</li> <li>2. El secuestro por adsorción es sensible al pH.</li> <li>3. El estado de valencia del metal no puede ser alterado biológicamente, por ejemplo, para dar formas menos solubles.</li> <li>4. Las especies organometálicas no son susceptibles de degradación.</li> <li>5. El mejoramiento de estos procesos biológicos es limitado ya que las células no efectúan un metabolismo; la producción de agentes adsorbentes ocurre durante la etapa de crecimiento.</li> </ol>
<b>CÉLULAS VIVAS</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aunque cada célula puede llegar a saturarse, el sistema se auto-restablece debido al crecimiento.</li> <li>2. Los metales se depositan en un estado químico alterado y menos sensible a la desorción espontánea.</li> <li>3. La actividad metabólica puede ser la única forma económica de lograr cambios en estado de valencia o degradar compuestos organometálicos; se pueden utilizar sistemas multienzimáticos.</li> <li>4. Se pueden mejorar las cepas por medio del aislamiento de mutantes o la manipulación genética, debido a que ésta es una propiedad microbiana más que un producto bajo explotación.</li> <li>5. Se pueden emplear dos o más organismos de una manera sinérgica.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La toxicidad: sólo se pueden tratar los metales a bajas concentraciones. Sin embargo, se han utilizado cepas resistentes a los metales.</li> <li>2. Es necesario alimentar los flujos bajo condiciones fisiológicamente permisibles.</li> <li>3. Se necesitan nutrientes para el crecimiento.</li> <li>4. La deposición de los productos metabólicos y los nutrientes no consumidos.</li> <li>5. Los productos metabólicos pueden formar complejos con los metales, impidiendo la precipitación.</li> <li>6. La recuperación de los metales por desorción es limitada, debido a que pueden formar uniones intracelulares.</li> <li>7. El modelado de un sistema no definido representa grandes dificultades matemáticas.</li> </ol>

Fuente: Revista Latinoamericana de Microbiología (2000) 42:131-143  
Adaptado de Macaskie, 1990.

## 1.6 Usos y Aplicaciones

En los últimos años han proliferado los estudios sobre diversos tipos de biosorbentes especialmente algas y residuos agrícolas, analizando su capacidad para retener diversos metales pesados.

**Tabla. 1.6. Biosorbentes mas comunes utilizados en la remoción de metales traza.**

Sorbente	Cd <sup>+2</sup>	Cr <sup>+3</sup>	Cr <sup>+6</sup>	Hg <sup>+2</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Ni <sup>+2</sup>
Quitosán	558	92	273	1123	796	2,4
Montmorillonita	4,78				0,68	
Bentonita	11,41		0,57			
Turba	5,06	76	43,9	16,2	230	
Corteza pino silvestre		8,69				
Cáscara de nuez	1,5		1,33			
Corcho	32	19,45		400	182	4,10
Café turco	1,17		1,63			
Vaina del arroz	21,36		164,31		11,40	
Serrín			2,29	16,05		
Residuos de la agricultura ( <i>Citrus Reticulata</i> )						54,35
Musgo	46,65					
Algas marinas	215				344	
Piel de naranja		275				
Corteza de pino	8	19,45				
Hoja de secuoya seca				175		
Pulpa de bambú seca				15,6	15,0	
Lodos activos de aguas residuales				460	95,3	
Residuos de tallos de uvas	9,18					

Fuente: Caracterización de la biosorción en hueso de aceituna, 2006.  
Autor: Germán Tenorio Rivas.

## 1.7 Aprovechamiento

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define a un residuo como:

Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que pueden ser susceptibles de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final.

Vivimos en un contexto en el que la producción de residuos se encuentra en continuo aumento y la actividad económica vinculada a ellos alcanza cada vez mayor importancia.

Los residuos industriales, agrícolas, y urbanos considerados no peligrosos son ampliamente utilizados en el mundo para la producción de bioenergía, descontaminación del agua, recuperación de metales preciosos, películas biodegradables, producción del papel, obtención de aditivos para alimentos, abono, materiales de construcción, etc.

**Tabla. 1.7. Ejemplos de residuos utilizados para distintas actividades humanas.**

<b>Aprovechamiento</b>	<b>Producto</b>	<b>Tipo de Residuo</b>
<b>Enérgico.</b>	- Etanol - Biogas	- Caña de Azúcar - Residuos Urbanos
<b>Descontaminación.</b>	- Biosorbentes	- Hueso de aceituna
<b>Recuperación de Metales Preciosos.</b>	- Biosorbentes	- Cáscara de Cebada
<b>Producción del papel.</b>	Biocompuestos celulosa.	de - Cáscara de Arroz. - Cáscara de Platano.

<b>Obtención de aditivos para alimentos.</b>	- Complejo Cúprico de Clorofila.	- Cesped
<b>Materiales para la Construcción.</b>	- Tablero de partículas	- Aserrín - Bagazo de Caña.
<b>Abono</b>	- Agricultura	-Bagazo de Caña - Residuos Orgánicos

En el municipio de Othón P. Blanco existen tres tipos de aprovechamiento de los residuos agrarios dentro de las comunidades ejidales.

- Aprovechamiento energético
- Aprovechamiento agrícola
- Aprovechamiento ganadero

Dentro del aprovechamiento energético se encuentran los residuos leñosos que utilizan para la fabricación de carbón en la industria azucarera. Los restos de madera o astillas que por sus características no son requeridas para generación de energía son destinadas a los astilleros para la elaboración de aglomerados y tableros de partículas.

En cuanto al aprovechamiento de la materia fecal producida por el ganado, se preparan mezclas de composta en conjunto con el bagazo de la caña de azúcar, para ser utilizados posteriormente en abono.

Existe dentro de la población ejidal del Municipio de Othón P. Blanco una gran preocupación respecto a los residuos que se generan en la limpieza parcelas, aún no se encuentra un uso a la especie pirofílica *Pteridium aquilinum* que ocupa entre el 60 y 85% de los residuos agrícolas en el municipio antes mencionado.

## Capítulo 2. Helechos

### 2.1 Definición del género *Pteridium*

Las especies del género *Pteridium* están consideradas entre las plantas invasoras más exitosas del mundo.

Se encuentra en los cinco continentes, tanto en zonas templadas como tropicales y desde el nivel del mar hasta altitudes que superan los 3000 metros. Afectan profundamente los ecosistemas intervenidos por la actividad humana y son especialmente propensos a invadir sitios talados, campos de cultivo, pastizales inducidos, parcelas abandonadas y, sobre todo, áreas afectadas por incendios.

El género *Pteridium* presenta una serie de características anatómicas, morfológicas y fisiológicas que lo coloca entre las pocas especies herbáceas que llegan a ser dominantes en ciertas comunidades.

Tienen vasos en su xilema, un rizoma subterráneo que se ramifica indefinidamente en brotes largos y cortos, esporas que permanecen viables por lo menos una temporada después de ser dispersadas, hojas jóvenes ricas en glucósidos cianogénicos, y hojas maduras ricas en taninos.

El rizoma del *Pteridium* se ramifica indefinidamente y puede crecer hasta 2m en una sola temporada lo que le confiere una gran capacidad de colonización.

## 2.2 Especies de *Pteridium* y distribución geográfica

Distribución mundial: América, África, Europa, este de Asia y algunas islas del Pacífico como Hawai y Nueva Zelanda.

En México crecen tres especies de *Pteridium* todas ampliamente distribuidas en el país:

- *Pteridium caudatum* (L.) maxon
- *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) maxon
- *Pteridium aquilinum* (L.) kunh

## 2.3 *Pteridium caudatum* (L.) maxon

Plantas entre 28 cm a 2,60 m de altura, con rizomas subterráneos, delgados, con un diámetro de 2 cm, rastreros, largos, cubiertos de pelos color pardo sin escamas. Las hojas se encuentran distanciadas aproximadamente 2,2 cm a lo largo del rizoma, pecíolo de 0,8 - 3,2 cm de diámetro glabro a parcialmente piloso, raquis principal, secundario y vena media de los segmentos del fronde con una coloración parda oscura. Fronde con una longitud de 37 -62 cm, ancho de 30 -48 cm. Las pinnas tienen un largo de 26 -46 cm y un ancho de 17 -35 cm, de color verde brillante, las nervaduras son libres, bifurcadas, con ángulo de inserción de 40 -50°. El número de pínulas por pinna es de 6 - 9, con un rango de estas en la base de 12 -18. La lámina presenta forma triangular, tripinnada. Los márgenes de las pinnas son levemente curvados hacia la cara inferior, a veces endurecidos. En el envés de la lámina se observan pelos esparcidos color blanco de 0,5 cm de largo (Velázquez Montes, 2009).

#### **2.4 *Pteridium arachnoideum (Kaulf.) maxon***

Es un helecho fácilmente reconocible por sus grandes frondes, de hasta 2 m de largo, que se disponen a intervalos, sobre rizomas subterráneos, muy profundos y ramificados, cubiertos de pelos simples. Cada fronde presenta un pecíolo largo, bastante rígido y una lámina triangular de consistencia coriácea, muy dividida (3-4 pinnada) y pubescente en su cara inferior. Tanto el pecíolo como los raquis exhiben un surco dorsal tapizado de pelos. Los esporangios se agrupan en soros que se disponen en el margen inferior de la hoja, hallándose cubiertos por una membrana (indusio) rudimentaria y además por el borde de la lámina que se pliega hacia abajo. (Morero, *Boletín Informativo. No. 40; 2009*)

#### **2.5 *Pteridium aquilinum (L.) kunh***

Hojas 0.5-1.0 m largo; raquis escasa o densamente pubescente; penúltimos ejes pubescentes, abaxialmente con tricomas blancos, algunos pardo claros, esparcidos, erectos 1.0-1.5 mm largo, adaxialmente con tricomas glandulares cortos, blancos de ápice rojo, confinados a los surcos medios; láminas sin lóbulos libres entre los segmentos, con superficie abaxial pubescente a glabra sobre las venas entre la costa y los segmentos marginales; superficie adaxial con tricomas espaciados o escasos sólo a lo largo del margen reflexo, tricomas 0.5-0.8 mm largo, blancos; indusios falsos, 0.2-0.8 mm ancho, margen eroso con cilios largos, espaciados o numerosos, o glabro.

## 2.6 Problemática agrícola.

Durante los últimos 20 años las zonas de cultivo al sur de Quintana Roo se encuentran amenazadas por el helecho *Pteridium aquilinum* (L.) kunh. Las zonas de "helechales", como son conocidas localmente, están desplazando las áreas de cultivo hacia las zonas boscosas de los ejidos, por lo que las zonas ocupadas por este helecho quedan inhabilitadas para la práctica de cualquier actividad productiva.

Ramírez Trejo (2007) establece que el gran potencial competitivo de este helecho se debe a su amplia tolerancia al estrés y las perturbaciones ambientales, aspectos que responden, en gran medida, al producto de una exitosa combinación de características morfológicas y fisiológicas, entre las que destacan:

- 1) Sistema de rizomas o tallos subterráneos muy largo y longevo que se ramifica indefinidamente, confiriéndole una gran capacidad de invasión. Adicionalmente, estos órganos almacenan carbohidratos que pueden movilizarse rápidamente hacia las hojas y son los responsables de la abundante propagación vegetativa, por el gran número de yemas en estado latente que portan. Cada una, potencialmente puede formar nuevas hojas, especialmente después de quemas recurrentes (Ramírez Trejo *et al*, 2007).
- 2) Efectiva actividad alelopática y antidepredadora, resultante de la posesión de un amplio y poderoso arsenal químico de metabolitos secundarios, entre los que destacan las ecdisonas un tipo de hormonas que promueven la muda o ecdisis en los insectos, los sesquiterpenos, taninos, glucósidos cianogénicos, flavonoides y tiaminasa una enzima que descompone la tiamina o vitamina B1 (Ramírez Trejo *et al*, 2007).
- 3) Alto potencial reproductivo, cada planta produce cientos de millones de esporas microscópicas, transportadas grandes distancias por el viento, las cuales permanecen viables, es decir, capaces de germinar en la siguiente etapa favorable, después de la dispersion (Ramírez Trejo *et al*, 2007).
- 4) Fenotipo estructura o arquitectura que le confiere ventajas sobre otras plantas, como por ejemplo su tamaño, que en ocasiones supera tres metros de altura, además de que poseen tallos rígidos y hojas muy grandes de entre 1.5 y 3 metros,

amplias y sobrepuestas que privan de luz solar a las plantas subyacentes, debilitándolas o matándolas, al tiempo que impiden el establecimiento de otras especies colonizadoras (Ramírez Trejo *et al*, 2007).

La invasión de *Pteridium* representa un serio problema para la conservación y para los productores y administradores de recursos, pues retrasa la recuperación de la estructura y composición de los bosques y obstaculiza o, en el peor de los casos, imposibilita las labores agrícolas y forestales al obligar a los campesinos a abandonar sus tierras por la fuerte inversión inicial en mano de obra que requiere el abatimiento de la población de helechos, cuyos rizomas tallos subterráneos forman una densa red bajo el suelo que es extremadamente difícil de remover en su totalidad y prácticamente inmune a los herbicidas (Ramírez-Trejo *et al*. 2007).

Costos de la limpieza por parcela afectada:

**Tabla. 2.6.1. Costos de limpieza por 120 hm<sup>2</sup> de hectáreas destinadas a uso forestal.**

Hectáreas	Costo por Año.	Costo por día de limpieza.
120 hm <sup>2</sup>	401, 500 MXN	1,100 MXN

**Tabla.2.6.2. Costos de limpieza por 120 hm<sup>2</sup> de hectáreas destinadas a siembra de leguminosas y hortalizas.**

Hectáreas	Costo por Año.	Costo por día de limpieza.
120 hm <sup>2</sup>	2,640,000 MXN	7,232.87671 MXN

## **2.7 El helecho *Pteridium aquilinum (L.) kunh* y la salud.**

Adicionalmente, esta especie es un factor de riesgo asociado a la alta incidencia de cáncer gástrico en los estados (Amelot y Avendaño, 2001; Peraza *et al.*, 2002; Peraza *et al.*, 2003; Peraza *et al.*, 2006)

En un suelo asociado con el *Pteridium aquilinum (L.) kunh*, se encontró que contenía ácido phidroxibenzoico, vanillico, p-hidroxicinámico y ácido ferúlico, los cuales estaban presentes en altas concentraciones en las frondas (Whitehead, 1964; Glass, 1969).

La liberación de compuestos aleloquímicos por parte de las frondas del *Pteridium aquilinum (L.) kunh* varía según el ambiente, la variedad y la edad. (Gliessman, 1976). Los ácidos fenólicos producidos por la planta e incorporados al suelo son de considerable importancia en reducir el crecimiento de raíces en las especies potencialmente competidoras (Glass, 1976).

### Principio Tóxico

La ingesta del helecho seco o verde produce síndromes distintos en animales monogástricos y rumiantes. En caballos el principio tóxico es que que les afecta una enzima llamada tiaminasa que produce deficiencia de vitamina B1 o tiamina. En rumiantes se desconoce este principio tóxico, conociéndose que tanto la tiaminasa como el factor cancerígeno que afecta a los bovinos se localiza en las hojas de helechos frescos o secos, así como también en los rizomas, pero en estos últimos en una concentración cinco veces el principio activo (Arenas-Gasperin, 1930).

El helecho produce una sustancia fitotóxica que perturba el desarrollo normal de otras plantas, insectos y animales produciéndoles mutaciones (Arenas-Gasperin, (1930).

Se ha demostrado experimentalmente que es capaz de producir lesiones neoplásicas malignas en diversos tejidos de mamíferos de forma experimental, Se identificó al glucósido norsesquiterpeno ptaquilósido (PT) como el metabolito secundario más relevante desde el punto de vista tóxico en *Pteridium spp.* Este compuesto es el responsable de causar, no solo carcinogenesis, sino también la degeneración de la retina, en ovinos y la aplasia mieloide, en bovinos. Su concentración en la planta puede resultar elevada. Está establecido un modelo experimental de carcinogénesis donde se induce cáncer mamario y múltiples tumores en la sección final del intestino delgado al administrar por vía oral el ptaquilósido a ratas hembras Sprague-Dawley.

Evidencias epidemiológicas indican la presencia de cáncer en las poblaciones en riesgo, a través del consumo directo de la planta en la dieta o a través del consumo de leche y carnes de rebaños que padecen Hematuria Bovina. Existen también trabajos que evidencian la asociación entre la intoxicación crónica por *Pteridium aquilinum (L.) kunh*, la infección por virus del papiloma y el desarrollo de carcinomas, poniendo de manifiesto un efecto inmunosupresor por parte del (PT) presente en la planta, lo que a su vez sería un factor que agravaría el proceso carcinogénico (Marrero, 2012).

## 2.8 Usos del Helecho *Pteridium aquilinum* (L.) kunh.

Tabla. 2.8.1 Usos del Helecho Común en el mundo.

Uso	País
Alimenticio	Japón, Nueva Zelanda, Australia y México.
Ornamental	Estados Unidos, México
Medicinal	México, Colombia, Nicaragua, Venezuela, Belice, El Salvador y Guatemala.

### Usos Biotecnológicos de *Pteridium aquilinum* (L.) kunh en México

Actualmente en México se hace uso del extracto del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) kunh como tratamiento biológico para el control de plaga de la mosca frutera (*Anastrepha ludens* (Loew)) en los cultivos de mango.

## 2.9 Métodos de control

Tabla 2.9.1. Métodos de Control.

<b>Corta Periódica:</b>	<b>corta estacional del helecho con el objetivo de disminuir las reservas del rizoma</b>
<b>Golpeo:</b>	<b>Se golpean las plantas, disminuyendo de esta forma la reserva alimenticia del helecho.</b>
<b>Arado:</b>	<b>Consiste en remover la tierra para exponer los rizomas a la intemperie lo que causa su muerte.</b>
<b>Aplastado:</b>	<b>En el que se pasa una maquina para aplastar el helecho y de esta forma disminuir las reservas del rizoma.</b>
<b>Arrancado:</b>	<b>Consiste en arrancar el helecho.</b>

<b>Uso de Herbicidas:</b>	<b>Se utilizan químicos como el asulam y glyfosato en aspersión, estas dos sustancias son las únicas aprobadas para combatir al <i>Pteridium Aquilinum</i>.</b>
---------------------------	---

La mayoría de los métodos de control citados están dirigidos a limpiar las áreas, pero no a la recuperación del suelo y menos al aprovechamiento de esta especie.

## Capítulo 3. Materiales y Métodos

A partir de la necesidad por encontrar una nueva alternativa natural para el control de la plaga *Pteridium aquilinum (L.) kunh* y reemplazar así los herbicidas sintéticos, se plantea la posibilidad de utilizar la biomasa muerta del helecho *Pteridium aquilinum (L.) kunh* como biomaterial para la biosorción de plomo en agua, ofreciendo un nuevo uso y aprovechamiento a esta plaga.

Actualmente son conocidos una gran cantidad de biosorbentes que resultan efectivos para la separación de metales pesados, si bien algunos de ellos resultan con mayor utilidad para ciertas aplicaciones, es necesario que se determine si el material a utilizar cumple con las características de un biosorbente.

A continuación se puede observar una tabla comparativa de las características respecto a la afinidad y al origen que posee el helecho *Pteridium aquilinum (L.) kunh* para poder ser usado como biosorbente.

**Tabla. 3.1 Características con Respecto a la Afinidad.**

<b>Afinidad</b>	
<b>Características del biosorbente</b>	<b>Características del helecho <i>Pteridium Aquilinum</i></b>
El biosorbente debe tener una elevada afinidad por el tipo específico de metal contaminante.  El biosorbente debe tener una elevada capacidad de retención de metales pesados en general (Kratochuil y Volensky (1998)).	El helecho PA no ha sido probado específicamente como biosorbente de plomo, sin embargo <i>Barriada (2008)</i> propone la biomasa muerta del helecho PA como biosorbente eficaz en la biosorción de Cadmio.

Con respecto al origen de los biosorbentes (Viera y Volesky, 2000) señalan que puede ser alguno de los siguientes:

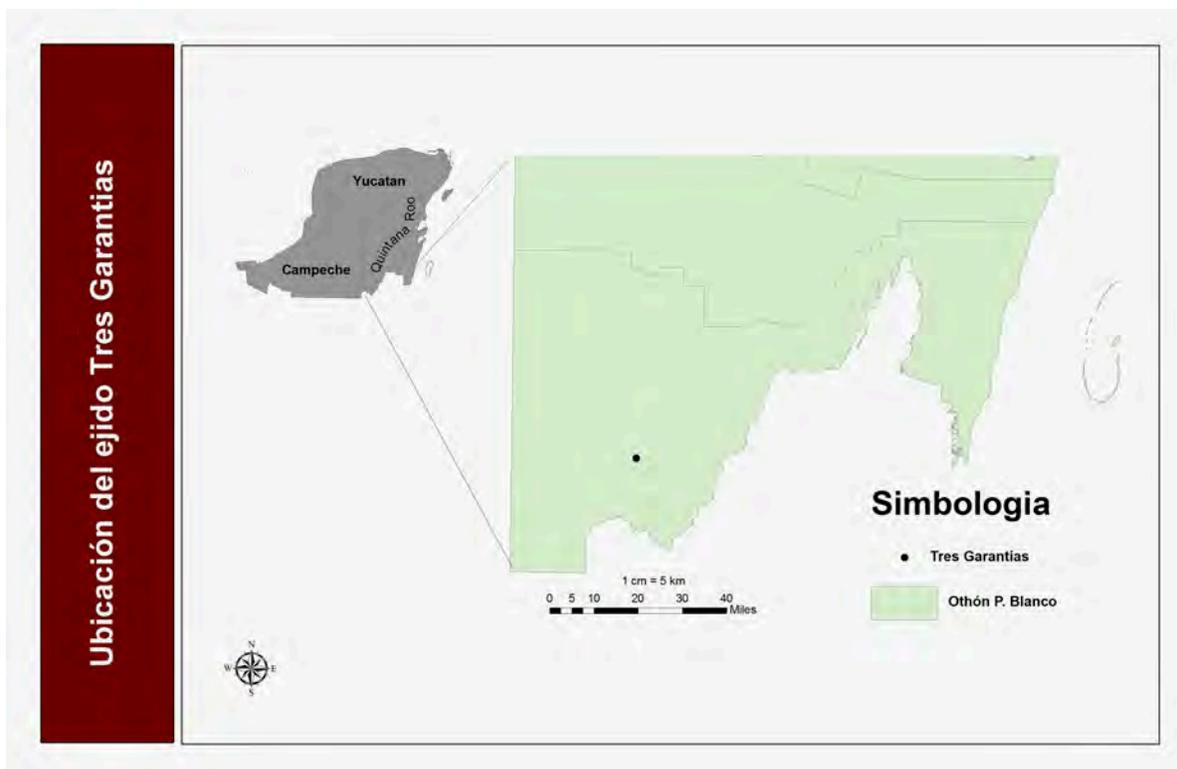
**Tabla. 3.2. Características Respecto al Origen**

Origen	
Características del biosorbente	Características del helecho <i>Pteridium Aquilinum</i>
Residuos procedentes de diversas actividades agrícolas, industriales, etc. Por lo que su precio es muy bajo o nulo.	El helecho PA se considera un residuo no deseado durante la limpieza de parcelas, ya que al secarse puede provocar incendios.
Organismos fácilmente disponibles y que se encuentren en grandes cantidades en la naturaleza.	El helecho PA se encuentra ampliamente distribuido de forma natural, llegando a considerarse "plaga" en zonas de cultivo.
Organismos especialmente cultivados para su uso en biosorción, con una capacidad de reproducción elevada.	A pesar de que aún no se le ha cultivado especialmente para su uso en biosorción, cuenta con una capacidad de reproducción elevada (7-15 días).

Teniendo en cuenta que la disponibilidad y el bajo coste son los principales factores para seleccionar un biosorbente, los residuos procedentes de helecho *Pteridium aquilinum* (L.) kunh durante la limpieza de parcelas, son potencialmente, biosorbentes de interés en aquellas zonas donde se cultivan hortalizas o se aprovechan especies forestales y la aparición del helecho *Pteridium aquilinum* (L.) kunh resulta negativa.

### 3.3 Área de toma de muestras

El ejido Tres Garantías cuenta con una superficie de 44,500 hectáreas, ubicado en el extremo sur de Quintana Roo, a 50 km de la frontera con Belice. Tres Garantías pertenece al municipio de Othón P. Blanco, el de mayor tamaño de la superficie estatal, 39.9% donde se encuentra Chetumal, la ciudad capital.



Sus coordenadas geográficas son  $17^{\circ} 12'$  de latitud norte y  $88^{\circ} 55' 50''$  de longitud oeste. En los alrededores de la comunidad se localizan el poblado de San José de la Montaña y Nicolás Bravo al Norte, y al Sur con Tomás Garrido.

El acceso a la comunidad es únicamente por vía terrestre, en un camino revestido de 43 km que se intercepta con la carretera numero 186 dirección oeste-este de enlace entre las ciudades de Escárcega (Campeche) y Chetumal (Quintana Roo) (Dabault *et al*, 2007).

### **3.4 Información obtenida del área de toma de muestras.**

Durante las visitas al ejido tres garantías se pudo observar que la especie *Pteridium aquilinum (L.) kunh* ha invadido gran parte de la superficie destinada a la agricultura, sin embargo se pudo determinar que los helechales existentes en las áreas destinadas a plantaciones forestales han desaparecido un 80%, esto puede deberse en medida que la especie perenne toma mayor tamaño y proporciona sombra al suelo, los helechos reciben menos luz solar por lo cual desaparecen.

De igual forma se pudo observar que la especie *Pteridium aquilinum (L.) kunh* no se encuentra donde abundan suelos con drenaje deficiente o que tienden a la acumulación de agua producto de las lluvias.

De acuerdo con lo anterior se puede inferir que las plantaciones comerciales forestales con especies de rápido crecimiento pueden contribuir a la erradicación del helecho y al mejoramiento del suelo, de una forma natural sin hacer uso de productos químicos que afectan al ambiente.

### **3.5 Muestreos**

Las muestras fueron tomadas durante la temporada otoñal del año 2015, para llevar a cabo el muestreo se trazo un polígono sobre una superficie destinada a formar parte de una plantación forestal comercial de la especie *Gmelina arborea*. En el momento de la toma de muestras la superficie se encontraba en barbecho y los helechales eran abundantes.

Dentro del polígono se tomaron ejemplares adultos al azar, hasta obtener un peso de 2kg de materia verde, posteriormente se resguardaron en bolsas de plástico para su traslado a la ciudad de Chetumal.

### 3.6 Procedimiento experimental

El presente pocedimiento se elaboró siguiendo los procesos expermientales de Cardona-Gutiérrez, Cabañas *et al.* (2013) exceptuando la activación química previa.

Lavado del material de laboratorio

Todo el material de vidrio se sumergió durante 72 horas en ácido nítrico al 10%, para posteriormente lavarlo con agua destilada.

Preparación del biomaterial

1. Lavado del helecho con agua destilada (este proceso se repitió tres veces).
2. Secado a 70° C durante 8 horas.
3. Trituración y cribado para obtener el polvo adsorbente del helecho *Pteridium aquilinum Kunh.*

Reactivos

Se prepararon cuatro concentraciones distintas de acetato de plomo en agua destilada.

Preparación de la solución metálica: Las soluciones acuosas con metal se prepararon disolviendo  $Pb(C_2H_3O_2)_2$  en agua desionizada para obtener las siguientes concentraciones de Pb.

**Tabla 3.8. Concentración de acetato de plomo en la solución acuosa.**

Clave Interna del Laboratorio	Concentración Pb mg/ml
C1	60.8032
C2	863.7647
C3	73.2842
C4	111.7159

### 3.9. Proceso

1. Se pesaron 5 gramos del biomaterial en la balanza analítica.
2. En un vaso de precipitado se vertieron 150 ml de la solución metálica y el biomaterial fue agregado.
3. Se utilizó un agitador orbital para mejorar el contacto entre sorbente y solución, a una velocidad de 175 rpm.

El proceso de mezclado se dividió en dos etapas, en la primera etapa se mezclaron dos concentraciones distintas y se utilizó el mismo tiempo de mezclado para ambas concentraciones.

**Tabla 3.9. Concentración con relación al tiempo de contacto.**

<b>Pb mg/ml</b>	<b>Tiempo de mezcla</b>
<b>CI1 60.8032</b>	5 horas
<b>CI2 863.7647</b>	5 horas

En la segunda etapa se mezclaron dos concentraciones distintas y se utilizaron tres tiempos de mezclado diferentes por cada concentración.

**Tabla 3.9.1 Concentración con relación al tiempo de contacto.**

<b>Pb mg/ml</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
<b>CI3 73.2842</b>	1 hora 30 min	3 horas 20 min	7 horas
<b>CI4 111.7159</b>	1 hora 30 min	3 horas 20 min	7 horas

1. Una vez finalizado el tiempo de mezclado se procedió a filtrar la solución al vacío utilizando un matraz kitasato.
2. Obtenida ya la mezcla de solución metálica y biosorbente se procedió a su almacenamiento en envases cilíndricos de plástico previamente esterilizados.

### **Lecturas de espectrofotometría**

La concentración de Pb se determinó mediante un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC modelo AVANTA PM. Accesorio de Flama aire – acetileno.

Calibración con solución Pb 5 ppm.

Unidad de digestión semi-micro Kjeldahl marca TECNOLAB de 6 plazas.

Equipo volumétrico clase A seriado individual y certificado para calibración.

**Observaciones:** Se analizaron dos blancos de tratamiento y triplicado de material de referencia certificado (MRC) para control de calidad. Se analizó una solución estándar de chequeo con recuperación en el rango 90-110 %. Curva de calibración con valor de  $r^2 = 0.9999$ . Todos los parámetros de validez medidos están dentro de los criterios de aceptación del método; establecidos para el sistema de gestión de la calidad (SGC) de los Laboratorios Institucionales de ECOSUR.

## Capítulo 4. Resultados y Discusión

### 4.1 Resultados

Clave Interna del Laboratorio

CI: Concentración inicial

CB: Concentración y biosorbente

CF: Concentración final

T: Tiempo de mezclado

%R: Porcentaje de remoción metálica

**Tabla 4.1.1: Tabla de resultados primera etapa.**

Clave	T	CI (Pb $\mu\text{g/mL}$ )	CF(Pb $\mu\text{g/mL}$ )	%R
CB1	5 horas	60.8032	5.8276	90.42%
CB2	5 horas	863.7647	12.5561	98.55%

**Tabla 4.1.2: Tabla de resultados segunda etapa.**

T	Clave	CI(Pb $\mu\text{g/mL}$ )	CF(Pb $\mu\text{g/mL}$ )	%R
T1	CB3	73.2842	8.0414	89.03%
T2	CB3	73.2842	4.3650	94.05%
T3	CB3	73.2842	4.6463	93.66%
T1	CB4	111.7159	23.7264	78.77%
T2	CB4	111.7159	20.3654	81.78%
T3	CB4	111.7159	16.2379	85.47%

## 4.2 Análisis de resultados

**Tabla 4.2.1: Listado de eficiencia de adsorción de mayor a menor con relación al tiempo de contacto.**

CI: Concentración inicial  
 CB: Concentración y biosorbente  
 CF: Concentración final

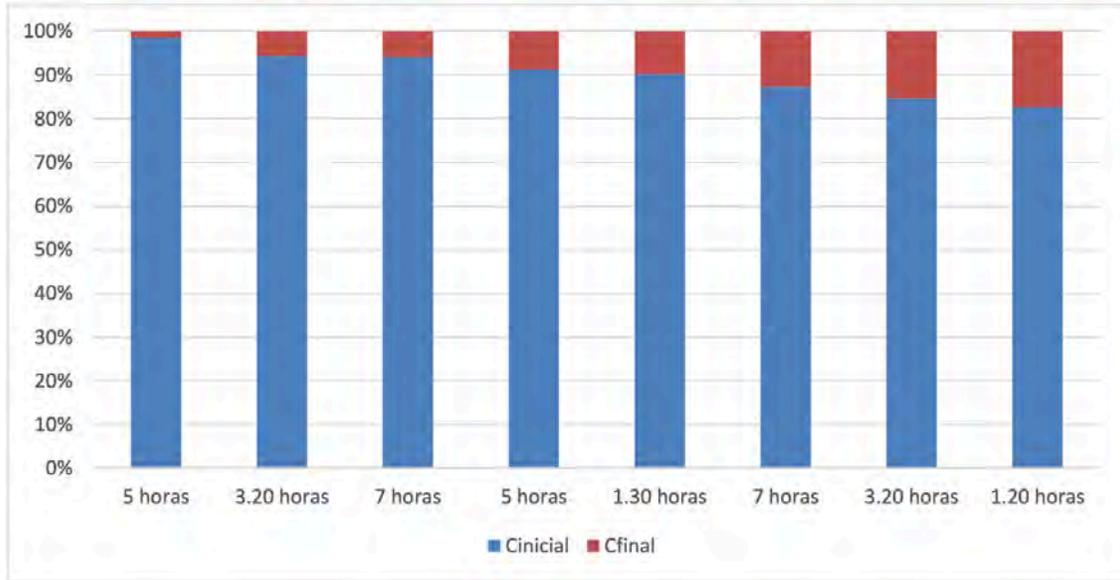
-----	Mayor porcentaje de remoción.
-----	Segundo lugar en porcentaje de remoción.
-----	Menor porcentaje de remoción.

Clave	Tiempo de contacto	Porcentaje de adsorción	Concentración Inicial (Pb µg/mL)	Concentración final (Pb µg/mL)	Eficiencia (mg/g) Pb
<b>CB2T</b>	<b>5 horas</b>	<b>98.55%</b>	<b>863.7647</b>	<b>12.5561</b>	<b>170.24</b>
CB3T2	3 horas, 20 min	94.05%	73.2842	4.3650	13.78
CB3T3	7 horas	93.66%	73.2842	4.6463	13.72
CB1T	5 horas	90.42%	60.8032	5.8276	10.99
CB3T1	1 hora, 30 min	89.03%	73.2842	8.0414	13.04
CB4T3	7 horas	85.47%	111.7159	16.2379	19.09
CB4T2	3 horas, 20 min	81.78%	111.7159	20.3654	18.27
CB4T1	1 hora 30 min	78.77%	111.7159	23.7264	17.59

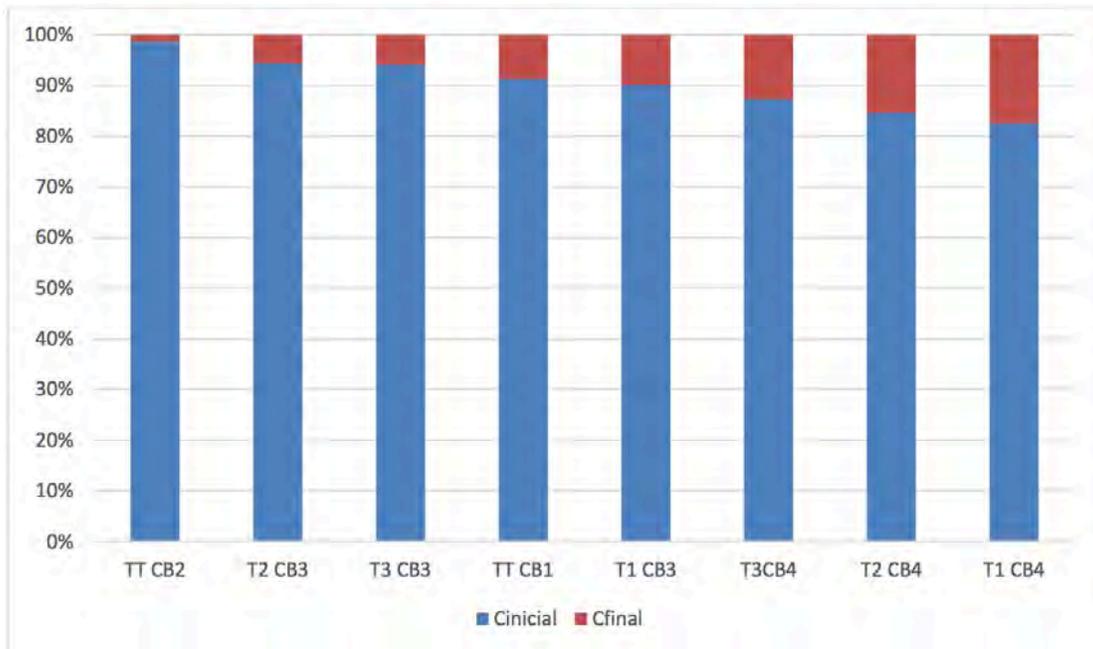
La clave **CB2T** a 5 horas de tiempo de contacto tiene la mayor eficiencia de remoción con 170.24 mg/g de Pb.



**Gráfico 4.2.1. Remoción primera etapa.**



**Gráfico de barras. 4.2.2. Eficiencia de remoción con relación al tiempo de contacto.**



**Gráfico de barras. 4.2.3. Porcentaje de remoción con relación a la concentración.**

Los resultados obtenidos, respecto del tiempo de adsorción, sugieren que el proceso de adsorción se realizó en dos etapas, una primera etapa piloto que consta de dos concentraciones distintas, mientras el tiempo de contacto es el igual en ambas. Y una segunda etapa donde se hicieron dos concentraciones con tres replicas por cada concentración, variando el tiempo de contacto.

Analizando la tabla 4.2.1, y la gráfica 4.2.1, se puede observar que existe mayor porcentaje de remoción a mayor concentración del metal, de igual forma se puede inferir que el tiempo para tener la eficiencia ideal de biosorción se sitúa entre las 5 y las 3 horas 20 minutos de contacto.

Interpretando el gráfico de barras 4.2.2 y 4.2.3, es evidente que existe una relación tiempo-tamaño de partícula, la razón por la cual a mayor tiempo de contacto menor adsorción se debe principalmente a que existe una saturación metálica dentro de la partícula y en vez de retenerlo celularmente lo excreta de vuelta a la solución. es posible que si se cuenta con mayor tamaño de partícula se podría tener un aumento en el rango de tiempo de contacto sin afectar la eficiencia de adsorción.

Sin embargo se pretende tener la mayor adsorción en el menor rango de tiempo posible con el fin de disminuir los costos dentro del proceso y convertir el biosorbente en una opción rentable y eficiente. Es preciso mencionar que según (Quingbiao *et al.* 2004) otro factor referente a la naturaleza del adsorbato en el caso de los metales, se refiere al radio atómico del metal, pues se cree que a mayor tamaño de este disminuye la afinidad por los ligandos de la pared.

La adsorción es un proceso exotérmico y se produce por tanto de manera espontánea si el adsorbente no se encuentra saturado. La cantidad de material que se acumula depende del equilibrio dinámico que se alcanza entre la tasa a la cual el material se adsorbe a la superficie y la tasa a la cual se puede liberar, y que normalmente dependen de forma importante de la temperatura Carrera (2008).

La biosorción ocurre cuando los cationes de los metales se unen por interacciones electrostáticas a los sitios aniónicos que se encuentran en los biosorbentes. Estos

sitios que sirven como centros activos para la biosorción se encuentran ubicados en los grupos de los carboxilo, hidroxilo, amino, sulfónico, que forman parte de la estructura de la mayoría de los polímeros de origen natural.

El helecho *Pteridium aquilinum kunh*, ha sido utilizado por algunos autores para la biosorción de metales pesados por ejemplo: Barriada *et al.* (2008) realizó un estudio de caracterización del helecho para su uso como material biosorbente, en el cual concluyo que esta especie en las condiciones adecuadas, puede ser utilizada como material adsorbente para la eliminación de metales como el Cr (III) presente en disolución acuosa.

### 4 .3 Discusión

Comparando con las capacidades máximas de adsorción (mg/g) obtenidas en otros estudios como menciona (C. Tejada *et al.* 2016) usando materiales como bagazo de caña modificado con trietilentetramina (2), bagazo de caña con nanotubos de carbono (56, 60), rosa bourbonia (120,48), pulpa de papel modificada con ácido cítrico (34,6) y carbón activado de pino (27,53), todos estos para la remoción de plomo, se establecen buenos resultados en el presente estudio, por lo que recomienda seguir investigando el uso de estas biomásas para su posible aplicación a nivel industrial.

El helecho *Pteridium aquilinum kunh* presenta varias ventajas en comparación con otros biosorbentes como por ejemplo: En relación a la temperatura, la mayor eficiencia de adsorción se lleva a cabo a temperatura ambiente por lo que no se requiere de costos extras para elevar o disminuir la temperatura del agua en caso de implementarse en efluentes industriales.

Los costos de preparación del material son menores en comparación de otros biosorbentes ya que no requieren de activación química por lo que resultan mas costeables y sustentables con el ambiente.

Las tecnologías microbianas que se han mencionado ampliamente en la literatura, aparentemente resultan costosas y por lo tanto de aplicación muy limitada en países como el nuestro, aún en vías de desarrollo. Sin embargo, los procesos de biosorción de metales pesados, particularmente aquellos que utilizan desechos orgánicos, podrían encontrar aplicación en México, ya que es un país que cuenta con una amplia gama de actividades del sector agropecuario el cual puede proveer la biomasa que sería utilizada como biosorbente.

A continuación se presenta una tabla comparativa del helecho como biosorbente.

**Tabla 4.3.1. Ventajas y Desventajas de usar el helecho común como biosorbente.**

Biosorbente Cascara de Naranja.	Ventajas ( <i>Pteridium Aquilinum Kunh</i> ).	Desventajas ( <i>Pteridium Aquilinum Kunh</i> ).
<p>La cascara de naranja es un desecho que se puede encontrar en todo el mundo. No representa un problema para la salud humana y animal.</p> <p>Presenta una eficiencia de 9.39 mg/g en concentración de .08 mg/mL Pb.</p> <p>El biosorbente requiere activación para mejorar su eficiencia.</p> <p>El aprovechamiento de la cáscara de naranja esta ligado completamente al crecimiento del árbol, cambios de estación y consumo humano. Mencionando de igual forma, la dificultad para la recolección y agrupación de la cáscara para obtener un biosorbente de uso industrial.</p>	<p>El biosorbente es un desecho indeseado por su alta afinidad al fuego, no es considerado alimento, su ingesta es tóxica resultando mortal para el ganado, es una especie competitiva que no permite el crecimiento de otras plantas.</p> <p>Presenta una eficiencia de adosorción 170.24 mg de plomo por gramo de biosorbente en concentración de 863.7647 (<b>Pb µg/mL</b>).</p> <p>El biosorbente no requiere previa activación para encontrar alta eficiencia, por lo que resulta económicamente viable y amigable con el medio.</p> <p>Rapido crecimiento, abundante biomasa, extracción sencilla y económica.</p>	<p>Pago mano de obra poda semanal.</p> <p>Existen biosobentes con activación previa que presentan una mayor eficiencia, como es el caso del bagazo de palma activada que cuenta con 451,07 mg pb /g de biomasa de eficiencia.</p>

## Capítulo 5: Conclusión.

Los resultados han demostrado que el helecho *Pteridium aquilinum kunh* es un biosorbente efectivo en la remoción de Pb de aguas contaminadas simuladas, superando la media de adsorción de otros biosorbentes de referencia. Por lo tanto, es necesario seguir esta línea de investigación para poder aplicar el biosorbente mencionado anteriormente en los tratamientos de remoción de Pb en los efluentes industriales, que presentan niveles de contaminación por pb por encima de los Límites máximos permisibles, con lo que no solo se plantea la posibilidad de aprovechamiento de este residuo; sino de abaratar los costos de tratamiento de los efluentes.

Los métodos de mayor aplicación en el tratamiento de efluentes que contienen metales pesados son los siguientes: precipitación, intercambio iónico, osmosis inversa y adsorción. Comparando dichos tratamientos, la biosorción presenta la ventaja de poseer las siguientes características: fácil operación, retención del metal en presencia de otros cationes y la posibilidad de recuperar los metales pesados.

Se considera importante resaltar que el helecho *Pteridium aquilinum kunh* es una opción extraordinaria para vincular biotecnología y bioética:

- \* El biomaterial ha demostrado ser un biosorbente eficiente a bajo costo.
- \* El biomaterial posee grandes cantidades de biomasa aprovechables.
- \* El biomaterial no se cultiva como alimento humano.
- \* La eficiencia del biomaterial ha demostrado que no se necesita preparación química previa para su uso como biosorbente, por lo que el costo de inversión es bajo y el impacto al ambiente es menor.
- \* El aprovechamiento del biomaterial supondría una mejora para la siembra de hortalizas y la prevención de incendios en el campo Mexicano.

## Recomendaciones:

- Realizar Isotermas de adsorción conforme al ph.
- Utilizar métodos de reticulación.
- Buscar otras fuentes biológicas similares para comparar los resultados.
- Estudiar el proceso de desorción del helecho *Pteridium aquilinum (L.) kunh.*
- Plantear la posibilidad de utilizar la especie como biopesticida debido a los acidos fenólicos que produce la planta de manera natural y los cuales al incorporarlos al suelo reduce el crecimiento de raíces.
- Plantear la posibilidad de usar el helecho como combustible gracias a los compuestos hidrocarburos que contiene.
- Plantear la posibilidad de utilizar esta especie para la producción de plásticos y materiales a base de biopolímeros.
- Estudiar la posibilidad en la fabricación de tensoactivos derivados de la saponina presnte en los glucosidos cianogénicos.
- En el uso del biosorbente estudiado como tratamiento de efluentes industriales, se recomieda hacerlo por medio de biodiscos recubiertos con membranas a base de filtros rellenos del biomaterial.

## **Anexos**

### **Anexo A**

#### **El plomo en la industria**

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.

Una vez dentro del cuerpo, el plomo se distribuye hasta alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones y los huesos, y se deposita en dientes y huesos, donde se va acumulando con el paso del tiempo. El plomo almacenado en los huesos puede volver a circular por la sangre durante el embarazo, con el consiguiente riesgo para el feto. Los niños con desnutrición son más vulnerables al plomo porque sus organismos tienden a absorber mayores cantidades de este metal en caso de carencia de otros nutrientes, como el calcio. Los grupos expuestos a mayor riesgo son los niños de corta edad (incluidos los fetos en desarrollo).

No existe un nivel de concentración de plomo en sangre que pueda considerarse exento de riesgo. Sí se ha confirmado, en cambio, que cuanto mayor es el nivel de exposición a este metal, más aumentan la diversidad y la gravedad de los síntomas y efectos a él asociados. Incluso las concentraciones en sangre que no superan los 5 µg/dl nivel hasta hace poco considerado seguro pueden entrañar una disminución de la inteligencia del niño, así como problemas de comportamiento y dificultades de aprendizaje.

Del 100% de plomo que se produce, 65% se utiliza como plomo metálico y el 35% como compuesto en óxidos y sales.

A nivel mundial, las actividades, que más daño ocasionan al suelo, agua y atmósfera son:

- Industria de cerámica y vidrio.
- Pigmentos.

- Industria de armamentos.
- Reactivos químicos.
- Tuberías.
- Aditivos antidetonantes de gasolina.
- Insecticidas.
- Protección contra rayos X.

**Tabla: Niveles de plomo en sangre en distintos grupos de población por país**

País	Población	Ubicación	Promedio
Argentina	Niños	Fuente fija	22.1 ± 7.5
Brasil	Adultos	Urbana	11.8 ± 5.2
	Adultos	Fuente fija	27.2 ± 5.7
	Niños	Urbana industrial	9.58 ± 4.6
	Niños	Fuente fija	39.0 ± 5.0
Chile	Lactantes	Urbana	4.3 ± 1.8
Ecuador	Niños	Urbana	28.8
	Niños	Urbana	14.4
	Adultos	Urbana	18.4
México	Niños	Urbana	9.0 ± 5.77
	Adultos	Urbana	9.74 ± 6.19
	Adultos	Urbana	10.55
	Niños	Rural	7.3
	Adultos	Rural	12 ± 7.2
Uruguay	Niños	Urbana	9.5
Nicaragua	Niños	Fuente fija	11.5 ± 3.7
Trinidad	Madres	Urbana	4.8 ± 2.03

Fuente: Howson, C. P., 1996.  
Instituto Nacional de Ecología

Actualmente México ocupa el quinto lugar a nivel mundial en producción de plomo, y el segundo en América Latina siendo Perú el país que encabeza la lista en el continente americano.

El plomo se encuentra contenido en la mayor parte de los minerales que se obtienen en las actividades mineras en México, las cuales se realizan desde los tiempos de la Colonia. Dichas actividades tienen una gran importancia si se considera que México es uno de los principales productores mundiales de más de una docena de minerales y metales, entre los que sobresale la plata. Al igual que en otros países, el plomo se produce a partir del beneficio de minerales y de su reciclado.

Las principales regiones productoras de plomo en el país durante 1998 fueron: Saucillo, Chih. (23.3%); Noria de los Ángeles, Zac. (14.7%); San Francisco del Oro, Chih. (9.5%); Santa Bárbara, Chih. (9.5%); Zimapan, Hgo. (7.4%); Mazapil, Zac. (6.5%) y Sombrerete, Zac. (5.3%).

En la presente investigación, se propuso clasificar las fuentes de contaminación por plomo en inorgánicas y orgánicas para mencionar la afectación existente a nivel suelo, hidrosfera y atmósfera.

a) Fuentes inorgánicas

Conformada, por el metal en sus diversas formas y sus compuestos o derivados del plomo, en forma de óxidos, sulfuros y sales, con estos agentes contaminantes del suelo y el agua se encuentran afectados.

b) Fuentes orgánicas

Las fuentes orgánicas más significativas, son los derivados de alquilo de plomo y el tabaco. Los derivados del plomo alquilico altera el aire ambiental y el Tabaco genera daño directo en el organismo humano.

**Listado de fuentes inorgánicas en México**

Minería  
Metalurgia  
Industria de acumuladores de plomo  
Recubrimientos  
Industria del vidrio  
Cañerías  
Soldadura de plomo  
Efluentes industriales variados  
Cerámica y Alfarería  
Industria textil

### **Listado de Fuentes orgánicas en México**

Tabaco  
Hortalizas expuestas a fertilizantes y plaguicidas inorgánicos  
Suelos Volcánicos  
Suelos aledaños a minas  
Pescados y productos marinos

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América, también ha establecido y difunde medidas prácticas para prevenir la exposición de niños y de la población general al plomo.

**Las bañeras.** La exposición potencial en bañeras muy viejas que tiene una capa de pintura a base de plomo, puede evitarse sellándolas con un encapsulante para prevenir que el plomo se disuelva.

**Las baterías** a base de plomo usadas en los autos son seguras siempre que estén selladas, pero el plomo y el ácido pueden escapar si se les maltrata, en cuyo caso se deben lavar bien las manos después de tocarlas.

**Los caños y soldadura de plomo.** EL agua ácida es un gran peligro, ya que provoca la solubilización del plomo de las tuberías hechas o soldadas con este metal. Por ello, se recomienda dejar correr el agua de 15 a 30 segundos antes de usarse, y emplear la primera agua que sale de la llave para regar las plantas; cuando se cocine se debe usar agua fría del grifo, nunca agua caliente.

**Los cosméticos.** Los productos cosméticos pueden tener un alto contenido de plomo (por ejemplo, algunos maquillajes hechos en la India). Siempre se tiene que leer la lista de ingredientes en la etiqueta cuando se escoge un producto.

**Las cerámicas.** Tanto las nacionales como de otros países hechas por artesanos, pueden llegar a contener plomo soluble, en cuyo caso no deben usarse para preparar o almacenar alimentos ni para consumirlos.

**Las envolturas para los alimentos.** Algunos materiales para envolver, como las bolsas, pueden contener tinta de plomo. No se deben reutilizar los materiales para envolver que contienen este tipo de tinta.

**Los grifos.** Algunos grifos o llaves de agua viejos se consideran como fuente de plomo porque están hechos de latón. El plomo en el grifo puede ser reemplazado por uno de cobre.

**Las latas de conserva de los alimentos.** Cuando se compran alimentos enlatados importados, se debe tener en cuenta que en algunos países todavía se usa plomo para sellar latas. No se debe guardar alimentos en latas abiertas, ya sean nacionales o importadas.

**Los periódicos impresos a color.** No se deben quemar papeles con tinta de color en el hogar o en el horno. Se debe lavar las manos después de tocar cualquier papel periódico impreso en color, como el papel de revistas de historietas o tiras cómicas y no se debe permitir ni a los bebés ni a los niños masticar este tipo de papel.

**Las persianas con tiras de plástico.** Se ha añadido plomo a algunas persianas con tiras de vinilo no glaseado para estabilizarlas, en especial aquellas hechas en China, Taiwan, Indonesia y México. Se deben comprar estas persianas si el embalaje indica la ausencia de plomo (por ejemplo "Formulación nueva", "Formula sin plomo" "Plomo no añadido" "¡Nuevo! Formulación de vinilo sin plomo").

**Los suplementos de calcio.** Lea la etiqueta y busque la cantidad de plomo en cada pastilla. La exposición máxima recomendada por el gobierno federal de Estados Unidos es 0.5 microgramos de plomo al día.

**Los tintes para el pelo.** Los tintes fabricados con acetato de plomo pueden ser peligrosos. Los productos alternativos para pintar el pelo pueden ser más seguros porque contienen tintes orgánicos y decolorantes que causan cambios inmediatos en el color y no requieren aplicación ni diaria ni semanal.

**El vidrio o el cristal.** Cuando se usan objetos de cristal, no se debe guardar líquidos en botellas o vasos de cristal emplomado, ni beber diariamente de un recipiente de cristal emplomado, en especial cuando la persona está embarazada, o alimentar a un infante o un niño usando una botella infantil o vaso de cristal emplomado.

**La joyería.** Los joyeros que usen el latón corren el riesgo de envenenarse, a menos que usen latón sin plomo y trabajen en un área que tenga ventilación adecuada. Los vendedores callejeros que hacen pulseras y otras joyas en casa, puede exponer a sus niños a un riesgo mayor de envenenamiento por plomo si no guardan los materiales que lo contienen fuera de su alcance.

**Artefactos para la pesca.** Derretir el plomo para hacer pesas puede exponer a los aficionados y a sus familiares a humo con niveles extremos de plomo.

**La pintura y el grabado.** Se ha descubierto que los grabadores y pintores que usan pintura a base de óleo corren riesgos mayores que cualquier otro artista, si esta contiene plomo.

**La soldadura.** Hecha por aficionados a la electrónica y por los que hacen sus propios arreglos y mejoras a su casa, si contiene plomo y es ingerida en cantidades minúsculas se sospecha que causa cáncer en la boca, la garganta o el estómago.

**Balas de plomo.** El tiro al blanco en el campo de tiro puede representar la amenaza de exposición excesiva al polvo de plomo para quién lo practica, a menos que haya ventilación adecuada y se adapten otras medidas de precaución.

Al dictar las medidas, se debe dar prioridad a reducir las formas de liberación al ambiente de las sustancias de control peligrosas que constituyen un riesgo inmediato e inadmisibles.

### **Tratamientos para la descontaminación de plomo**

La contaminación por metales pesados se debe manejar ya que estos elementos pueden quedar retenidos por procesos de adsorción, de complejación y de precipitación, ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas. También pueden pasar a la atmósfera por volatilización y moverse a las aguas superficiales y subterráneas; y causar impactos negativos en el medio ambiente, la salud humana y animal (Silva, Bonilla *et al.* 2010).

### **Aislamiento**

Son un complemento o una alternativa a las técnicas *in situ* cuando las características del suelo o de los contaminantes no permitan aplicar otras técnicas. También se pueden considerar una etapa previa y, generalmente, imprescindible en el tratamiento *ex situ* de los suelos contaminados, en los casos de ser necesarias la excavación y depuración en planta de un volumen de tierra determinado.

Las barreras de adsorción contienen rellenos que retiran contaminantes del agua subterránea capturándolos físicamente y reteniéndolos en la superficie de la barrera. Como barreras de adsorción se pueden utilizar zeolitas o el carbón activado.

Las barreras de precipitación contienen rellenos que reaccionan con los contaminantes del agua subterránea que circulan por el muro. La reacción produce un cambio en los contaminantes disueltos en el agua subterránea favoreciendo su salida del estado de disolución y su posterior precipitación. Los precipitados, "insolubles", quedan atrapados en la barrera, de manera que el agua subterránea sale limpia del otro lado.

Por ejemplo, el plomo es un contaminante común en sitios industriales donde se han reciclado baterías de automóviles sin las debidas precauciones. El ácido de las baterías saturado de plomo que se filtra por el suelo y llega hasta el agua subterránea de estos sitios es difícil de atrapar y tratar. Una barrera de precipitación rellena con piedra caliza construida a través del curso del agua subterránea ácida contaminada con plomo neutraliza el ácido. En consecuencia, el plomo pasa a estado sólido y queda atrapado en la barrera.

Las barreras de degradación causan reacciones que descomponen o degradan los contaminantes del agua subterránea, convirtiéndolos en productos inocuos.

### **Quelantes**

El tratamiento de los desechos que contienen plomo, se ha realizado de diferentes formas en función de la naturaleza del sustrato en el que se encuentre, así como del estado final en el que se desee obtener el plomo. Por ejemplo, para el tratamiento de suelos contaminados se han utilizado soluciones de EDTA, debido a la alta afinidad de este complejante por un gran número de metales (Amrate y Akretche, 2005; Lambrecht y col., 2011; Finžgar y Leštan, 2007)

Uno de los inconvenientes del uso de este quelante es que la posterior separación es energéticamente muy costosa, lo que hace poco viable emplear esta metodología para obtener plomo metálico o algún material de valor que sea fácilmente puesto en el mercado.

### **Fitorremediación in situ**

Una opción que permite mitigar la contaminación por metales pesados es la fitorremediación la cual es una estrategia dentro de la biorremediación que se enfoca en el uso de especies vegetales y la capacidad de ellas de absorber, acumular y tolerar altas concentraciones de sustancias contaminantes. Por medio del sistema de interacción suelo- planta se busca extraer el elemento selenio u otro metal determinando como disminuir su contenido en este tipo de suelos, buscando minimizar el impacto causado por este mineral y por tanto el riesgo que genera a esta población y a su producción agrícola (CARTES INDO, 2005).

En Hidalgo (México) en el año 2009 se realizó un estudio sobre la contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelo y agua, en donde se resaltó y destacó la sensibilidad relativa de algunas plantas a la presencia de metales pesados y la tendencia a acumular los mismos, haciendo énfasis en algunas características fisicoquímicas de los suelos y la fitotoxicidad de metales pesados. Por otra parte se dedujo que los altos niveles de metales encontrados como plomo, cadmio, níquel y manganeso presentes en el suelo y el agua utilizada para riego permiten visualizar como dichas concentraciones pueden acumularse en estos sistemas, reflejando la necesidad de establecer lineamientos básicos de gestión y manejo ambiental de cultivos buscando reducir el riesgo latente causado a la salud de animales y el ser humano por la presencia de dichos elementos (Prieto-Méndez et al., 2009).

(Ortiz-Cano *et al.* 2009) proponen una fitoextracción de plomo en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus L.*) y micorrizas. Además de seleccionar la especie vegetal adecuada, el manipular la rizósfera a fin de mejorar la

absorción de metales pesados durante el proceso de desarrollo de tecnologías de fitoextracción. En el presente caso, la manipulación del sustrato se realizó mediante la incorporación de micorrizas. Tal práctica permitió que las plantas de quelite absorbieran o metabolizaran el Pb o que dicho metal se acumulara dentro de los tejidos hoja, tallo y raíz, o bien, que los microbios en la rizósfera promovieran su movilización a los tejidos radiculares y subsecuentemente su translocación (Puschenreiter *et al.* 2001).

El efecto de las micorrizas sobre la fitoextracción de metales pesados ha sido poco investigado (Mahony, 2005; Baum *et al.* 2006).

(Giasson *et al.* 2006) encontraron una baja capacidad fitoextractora de Pb en experimentos de pastos con la adición de micorrizas arbusculares.

La fitoextracción debe considerarse como una tecnología de largo plazo, que puede requerir de varios ciclos de cultivo para reducir la concentración de los contaminantes a niveles aceptables. El tiempo requerido depende de la concentración y tipo de contaminante(s), de la duración del periodo de crecimiento y de la eficiencia de remoción de la especie utilizada (Volke *et al.* 2005).

### **Adsorción**

Para el tratamiento de aguas se han estudiado diversas posibilidades, principalmente la adsorción en materiales orgánicos como algas, cáscaras de semillas e incluso cáscara de plátanos (Liping y col. 2007; Acharya y col. 2009; Noeline y col. 2005), además de los métodos tradicionales de adsorción en resinas zeolíticas (Somerset y col., 2008; Katsou y col., 2011; Wang y Peng, 2010).

Se sometieron a estudio las plantas acuáticas *Eichornia crassipes* y *Ludwigia peploides* para determinar su capacidad de absorción de plomo y cadmio en sistemas de tratamiento individuales durante un lapso de 20 días en soluciones de acetato de plomo y cloruro de cadmio. Los resultados demuestran que ambas especies son recomendables para ser utilizadas como potenciales fitorremediadoras al adaptarse

muy bien a las condiciones experimentales y estudios anteriores respaldan la capacidad de absorción de plomo por *E. crassipes* (Pérez *et al*, s.f).

### **Recuperación Electroquímica**

La recuperación del metal se lleva a cabo mediante su deposición en forma metálica sobre el cátodo en un reactor electroquímico. Esto supone la formación de una nueva fase sólida. El tipo de reactor electroquímico se determina en función del valor del metal recuperado y de las leyes medioambientales. En segundo lugar, la elección del diseño está determinada por la posibilidad de reciclar el metal en forma metálica o como una disolución concentrada.

La recuperación de metales por electrodeposición normalmente se lleva a cabo a partir de disoluciones concentradas usando un reactor abierto. Esta geometría facilita la extracción y la recuperación masiva del metal. Cuando el principal objetivo es la eliminación de un metal contaminante en un efluente, es común encontrar concentraciones de metales pesados dentro del intervalo 1-1000 ppm. Estas concentraciones tan bajas obligan a imponer bajas densidades de corriente si se usan reactores convencionales. Debido a esta baja concentración de metales en disolución, es importante desarrollar reactores electroquímicos capaces de eliminar los metales en estas condiciones experimentales

### **Métodos de recuperación del material**

#### **Tratamiento por trituración directa (Mecánico)**

Este proceso consiste en la utilización de fuerzas mecánicas apoyado generalmente de un molino previo a un desensamble de los residuos electrónicos. Esta operación logra conseguir un material de finas partículas y/o pulverizados, capaces de ser tratadas posteriormente por una serie de operaciones unitarias (como ejemplo la

clasificación de materiales utilizando corrientes de aire, criba, ciclón, turbo-rotor, etc.) que son empleadas en función del tipo de residuo obtenido.

### **Separación magnética**

La separación magnética entre metales férricos y no férricos es una de las más utilizadas. Implica la separación magnética en un campo débil primordialmente para el hierro y otra en campo fuerte (para la separación de latones por ejemplo).

La separación por corrientes parásitas también es conocida como separación por la corriente de Foucault, también conocidas como “corrientestorbellino”, o Eddycurrent. Es un fenómeno que se produce cuando un conductor atraviesa un campo magnético. El movimiento relativo causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético (Ley de Lenz). Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del conductor, mayores serán las corrientes Eddy a los campos opositores generados.

### **Disolución ácida**

Es un esquema de separación de metales mediante la disolución de desechos en una mezcla ácida. El método se centra en la disolución del material de partida en una mezcla de ácidos sulfúrico, nítrico y clorhídrico.

### **Pirólisis e hidrólisis**

En la pirólisis, los metales son separados de los otros materiales, a través de la fundición o la oxidación. En la hidrólisis, los metales son disueltos en agua regia (compuesto de ácido clorhídrico y ácido nítrico) o mediante una solución de ácido clorhídrico y gas de cloro. Posteriormente, ciertos metales pueden ser precipitados o

reducidos directamente en relación con una sal o un gas orgánico. Después pasan por las etapas de limpieza o recristalización. El metal se separa de la sal por calcinación. Los metales primero son hidrolizados y posteriormente son pirolizados.

### **Calcinado o quemado**

Quemado de los componentes electrónicos, con la subsiguiente fundición con colector de cobre. El calcinado se realiza con dos objetivos: recuperación de metales de bajo punto de fusión, como el estaño, plomo y la eliminación parcial de materiales plásticos.

### **Pirometalurgia e hidrometalurgia**

Los procesos pirometalúrgicos son los métodos más antiguos, vigentes y de aplicación más frecuentes de extracción y purificación de metales. Los metales más comunes que se tratan por estos métodos incluyen cobre, níquel, plomo y cobalto. Los procesos de pirometalurgia utilizan una combinación de varios procesos adicionales.

Por otra parte, un proceso hidrometalúrgico cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. El proceso hidrometalúrgico más importante es el colado, aunque comúnmente también son frecuentes los procesos de lixiviación.

### **Copelación**

A pesar de que existe un gran número de publicaciones relacionadas con la remoción de plomo a partir de materiales sólidos y líquidos, hasta el momento no se ha puesto suficiente atención en los residuos provenientes de los ensayos por vía seca para la determinación de metales preciosos. La copelación es una metodología que se basa en la eliminación de sílice, y metales base, para obtener oro y plata en estado de alta pureza. La precisión de esta técnica es tan alta que es el método preferido para

cuantificar metales preciosos en muestras sólidos, generalmente minerales y concentrados.

(Alvarado-Hernández *et al.*, s.f) proponen un sistema de recuperación de plomo por copelación a partir de los desechos de análisis por vía seca, mediante un proceso de lixiviación con citrato a temperatura ambiente. Además, establecen las bases para realizar la separación de este metal, mediante un proceso de electrodepósito en un reactor de cilindro rotatorio.

## **Anexo B**

### 3.4 Caracterización Ambiental del Área de Estudio

El Ejido Tres Garantías se ubica en la unidad geomorfológica denominada "Planicie del Caribe". El área que abarca el presente estudio está integrada por terrenos llanos con pequeños lamerías aislados y áreas deprimidas denominadas localmente "bajos", que constituyen zonas anegables que conforman cuencas de captación y están delimitadas por terrenos más elevados. La altitud varía de un mínimo de 30 a un máximo de 300 metros s.n.m.

#### Hidrografía

Pertenece a la subcuenca del río hondo, el cual es parte de la vertiente oriental mexicana. El agua acumulada en la superficie forma lagunas o aguadas poco extensas que abundan durante la época de lluvias. Cerca de la comunidad existen diversas lagunas, entre las más conocidas están Bacardí y Honda (de esta última la gente consumía agua), las cuales se encuentran cerca de la carretera. El subsuelo contiene mantos acuíferos, pero estos se encuentran lejos de la superficie por lo que

no es común la existencia de pozos. Actualmente la principal fuente de agua potable es un pozo de captación (Dabault *et al.* 2007)

## Relieve y Clima

La comunidad se encuentra asentada sobre un relieve plano a unos 150 msnm. Sobre la carretera es posible apreciar varias estructuras de bajos o ak' alché, que son áreas de terreno planas delimitadas por porciones ligeramente más elevadas. Estos bajos son los que forman las lagunas debido a la impermeabilidad del suelo. Tiene un clima clasificado como cálido subhúmedo con lluvias en verano, humedad intermedia y aproximadamente 1500 milímetros anuales de precipitación. La temperatura media anual es de 24.3 °C.

## Suelo

### Clasificación Maya

### Clasificación FAO

Akalche	Gleysol
Kan kab	Vertisol
Tzequel	Litosol

Gleysol: Literalmente, suelo pantanoso. Suelos que se encuentran en zonas donde se acumula y estanca el agua la mayor parte del año dentro de los 50 cm de profundidad. Se caracterizan por presentar, en la parte donde se saturan con agua, colores grises, azulosos o verdosos, que muchas veces al secarse y exponerse al aire se manchan de rojo. La vegetación natural que presentan generalmente es de pastizal, Son muy variables en su textura pero en el ejido Tres Garantías predominan más los arcillosos, esto trae como consecuencia que presenten serios problemas de inundación durante épocas de intensa precipitación.

Vertisol: Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad.

Litosol: Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido, su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques y selvas su uso es forestal; cuando hay matorrales o pastizales se puede llevar a cabo un pastoreo más o menos limitado y en algunos casos se destinan a la agricultura, en especial al cultivo de maíz.

#### Factores Bióticos

De acuerdo con la clasificación de (Pennington y Sarukhan, 1968) en el área forestal permanente del Ejido Tres Garantías se pueden reconocer dos tipos de vegetación predominantes:

- 1) Selva mediana subperennifolia. Abarca la mayor parte del área forestal permanente aprovechable, donde ocupa una superficie de 23,440 hectáreas.
- 2) Selva baja subperennifolia. Se presenta principalmente en los bajos localizados en la parte oeste del ejido (el gran bajo de "El Bacardi", en el sureste (bajo "El Charro" y en el nordeste (bajo "La Muertita"). Ocupa una superficie de 8,625 hectáreas y no estará sujeta a aprovechamiento.
- 3) Selva mediana subperennifolia

#### Flora

Es una comunidad muy densa y biodiversa pero con una diversidad menor que la que presentan las selvas localizadas más al sur.

En la misma el 25% de los árboles se queda sin hojas durante la época seca, debido a factores de clima (precipitación media de 1,500 mm/año en Tres Garantías) y suelo (suelos calizos con alta permeabilidad y baja capacidad de retención de humedad, como son los de la mayor parte de la península de Yucatán). Una característica de numerosos ejemplares de este tipo de vegetación es la presencia de contrafuertes (telchaques). Éstos son particularmente conspicuos en *Swietenia macrophylla* y *Brosium alicastrum*.

Tabla 3.4.1: Listado de especies presentes en el área del proyecto.

<i>ESPECIE</i>	
<i>Nombre común</i>	<i>Nombre científico</i>
AMAPOLA	<i>Pseudobombax ellypticum</i>
BARI	<i>Callophylum brasiliense</i>
BAYO	<i>Aspidosperma cruentum</i>
CAOBA	<i>Swietenia macrophylla</i>
CEDRO	<i>Cedrela odorata</i>
CHACTECOK	<i>Sickingia salvadorensis</i>
CHACA	<i>Bursera simaruba</i>
CHECHEN	<i>Metopium brownei</i>
CHICOZAPOTE	<i>Manilkara zapota</i>
GRANADILLO	<i>Platymiscium yucatanum</i>
HIGO	<i>Ficus padifolia</i>
JABIN	<i>Piscidia piscipula</i>
JOBO	<i>Spondias mombin</i>
KATALOX	<i>Swartzia cubensis</i>
MACHICHE	<i>Lonchocarpus castilloi</i>
PALO DE TINTE	<i>Haematoxylon campechianum</i>
PASAAK	<i>Simarouba glauca</i>
PUCTE	<i>Bucida buceras</i>

RAMON	<i>Brosimum alicastrum</i>
SACCHACA	<i>Dendropanax arboreus</i>
TZALAM	<i>Lysiloma bahamensis</i>
BAYO	<i>Aspidosperma cruentum</i>
BOBCHICHE	<i>Coccoloba barbadensis</i>
BOOP	<i>Coccoloba spicata</i>
CARACOLILLO	<i>Sideroxylon gaumeri</i>
CILILLON	<i>Pouteria izabalensis</i>
COPAL	<i>Protium copal</i>
GUAYA	<i>Talisia olivaeformis</i>
GUAYANCOX	<i>Matayba opositifolia</i>
KANISTE	<i>Pouteria campechiana</i>
LOMO DE LAGARTO	<i>Acacia glomerosa</i>
OKNOM	n.i.
PALO DE GAS	<i>Amyris elemifera</i>
PALO DE ROSA	<i>Cosmocalyx spectabilis</i>
PALO DE SOL	<i>Blomia cupanioides</i>
PELMAX	<i>Aspidosperma megalocarpum</i>
PIMIENTA	<i>Pimenta dioica</i>
ROBLE	<i>Bourreria sp.</i>
TADSI	<i>Hippocratea celastroides</i>
TAMARINDO	n.i.
TASTAB	<i>Guettarda elliptica</i>
TUSIKCHE	<i>Licaria peckii</i>
YAAXNIK	<i>Vitex gaumeri</i>
ZAPOTILLO	<i>Pouteria unilocularis</i>

Listado de especies presentes en el área del Proyecto

Fuente: SEMARNAT, Oficio núm: 04/SGA/1803/11.

## Fauna

El área forestal permanente del ejido, dado el escaso grado de perturbación de las masas forestales naturales, presenta casi la totalidad de las especies registradas para formaciones de selva alta, mediana y baja. Existen indicadores importantes de este escaso grado de perturbación, como son la presencia de especies características de niveles altos de la pirámide alimentaria. Es de destacar la presencia relativamente abundante de tapir, especie que aprovecha los mosaicos de selva baja. Asimismo están presentes cuatro de los cinco félidos registrados en México. Es de destacar la presencia abundante de jaguar. El área forestal del ejido Tres Garantías tiene continuidad natural con los ejidos forestales Caoba, Laguna Om, Botes y el NCPE Guadalajara, donde se ha registrado la segunda población de

jaguar en importancia en América del Norte, después de la Reserva de la Biosfera de Calakmul.

Tabla 3.4.3: Lista de la clase Reptilia perteneciente al Ejido Tres Garantías de acuerdo con la NOM-061-SEMARNAT-1994

Especie	Nombre común
<i>Boa Constrictor</i>	Boa
<i>Micrurus Browni</i>	Coralillo
<i>Crotalus Sp.</i>	Cascabel
<i>Bothrops Sp.</i>	Nauyaca
<i>Staurotypos Triporcatus</i>	Guao
<i>Pseudemis Scripta</i>	Jicotea
<i>Crocodylos Moreletii</i>	Cocodrilo del Pantáno

Tabla 3.4.4: Lista de la clase aves perteneciente al Ejido Tres Garantías de acuerdo con la NOM-061-SEMARNAT-1994

Especie	Nombre Común
<i>Tinamus major</i>	Perdíz
<i>Ortalis vetula</i>	Chachalaca
<i>Penelope purpurascens</i>	Cojollite
<i>Crax rubra</i>	Hoco faisán
<i>Meleagris ocellata</i>	Pavo Ocelado
<i>Otus asio</i>	Búho
<i>Tyto alba</i>	Lechuza
<i>Ceryle torquata</i>	Martín Pescador
<i>Ramphastus sulfuratus</i>	Tucán
<i>Amazalia Yucatenesis</i>	Colibrí
<i>Amazona Spp.</i>	Loro
<i>Cardinalis cardinalis</i>	Cardenal Rojo

<i>Icterus Spp.</i>	Oropéndola
---------------------	------------

Tabla 3.4.5: Lista de la clase mammalia perteneciente al Ejido Tres Garantías de acuerdo con la NOM-061-SEMARNAT-1994

Especie	Nombre Común
<i>Didelphis marsupialis</i>	Tlacuache
<i>Tamandua tetradactyla</i>	Oso hormiguero
<i>Dasyopus novemcinctus</i>	Armadillo
<i>Allovatta Palliata</i>	Saraguato
<i>Ateles geoffroyi</i>	Mono araña
<i>Agouti paca</i>	Tepezcuintle
<i>Dasyprocta punctata</i>	Sereque
<i>Sphiggurus mexicanus</i>	Puerco espín
<i>Sciurus Sp.</i>	Ardilla
<i>Urocycon cinereoargenteus</i>	Gata de monte
<i>Procyon cotor</i>	Mapache
<i>Potos flavus</i>	Mico de noche
<i>Mephites macroura</i>	Zorrillo
<i>Mustela frenata</i>	Comadreja
<i>Eira barbara</i>	Cabeza de viejo
<i>Herpailurus yagouroundi</i>	Leoncillo
<i>Leopardus pardalis</i>	Ocelote
<i>Leopardus wiedii</i>	Tigrillo
<i>Phantera onca</i>	Jaguar
<i>Odocoileus virginianus</i>	Venado cola blanca
<i>Mazama americana</i>	Temazate
<i>Tayassu tajaiu</i>	Cerdo de monte
<i>Tayassu pecari</i>	Senso

## Anexo fotográfico



Imagen Fotográfica: Helecho *Pteridium aquilinum* a dos semanas de su crecimiento, en el área afectada.  
Lugar: Ejido tres garantías.



Imagen fotográfica: Área destinada al aprovechamiento forestal, previamente invadida por la especie *Pteridium aquilinum*, sin embargo al ser sembrada la especie *Gmelina arborea*, los “helechales” desaparecieron paulatinamente en un periodo de 6 meses sin afectar el crecimiento de la especie forestal. Los árboles en la foto cuentan con dos años de nacidos.

### **Grupos funcionales encontrados en la especie *Pteridium aquilinum* (L.) kunh.**

En la literatura existente se encontraron los polímeros pertenecientes al helecho común: Sesquiterpenos, taninos, flavonoides, glucosidos cianogénicos, y tiaminasa. Pertenecientes principalmente a los grupos funcionales: carboxilo, hidroxilo, y amino.

Las paredes celulares de los materiales bioadsorbentes contienen polisacáridos, proteínas y lípidos, y, por tanto, numerosos grupos funcionales capaces de enlazar metales pesados en la superficie de estos. Entre los grupos funcionales presentes se pueden mencionar los grupos amino, carboxílico, hidroxílico, fosfato y tiol que difieren en su afinidad y especificidad respecto a la susceptibilidad para unirse a los diferentes iones metálicos.

La pared celular realiza la retención del metal mediante una interacción fisicoquímica del metal con grupos amino e hidroxilo presentes en la pared, al igual que grupos fosfato, sulfihidrido y carboxilo. Esta interacción se traduce en la formación de un enlace covalente coordinado pues el ion metálico actúa como un átomo central que dispone de orbitales vacíos capaces de aceptar pares de electrones. Estos pares de electrones son precisamente donados por los grupos funcionales nombrados.

La formación de este enlace, puede estar acompañada por la dislocación de protones y dependiente en parte del grado de protonación de la pared que es determinado por el pH (Gupta *et al.* 2000).

Los metales son sustancias electropositivas ya que ceden cargas positivas a la superficie del sorbente, el cual va aumentando el número de cargas negativas para lograr la adsorción, lo cual se facilita en soluciones ácidas. En una solución alcalina los metales pesados tienden a formar hidroxocompuestos, los cuales posteriormente se precipitan (Navarro, 2006).

## Otros tratamientos adsorbentes en efluentes industriales.

Los metodos de mayor aplicacion en el tratamiento de efluentes que contienen metales pesados son fisicoquímicos: precipitación, intercambio ionico, osmosis inversa y adsorción. Comparando dichos tratamientos, la adsorción presenta la ventaja de poseer las siguientes características: facil operación, retención del metal en presencia de otros cationes y la posibilidad de recuperar los metales pesados.

**Tabla 4.4.1. Ventajas y desventajas de los tratamientos fisicoquímicos.**

Método	Ventajas	Desventajas
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicidad de operación.</li> <li>• Alto nivel de eliminación de metales pesados.</li> <li>• Bajo costo de operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La presencia de agentes orgánicos disminuye su rendimiento.</li> <li>• No es selectivo.</li> <li>• Se necesitan agentes coagulantes y floculantes para separar los metales del efluente.</li> <li>• Generación de lodos con alto costo de tratamiento.</li> </ul>
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible la eliminación de metales a muy bajas concentraciones.</li> <li>• Presentan alta selectividad.</li> <li>• Es posible la recuperación de los metales por electrólisis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La presencia de Calcio, Sodio y Magnesio disminuye su rendimiento debido a que pueden saturar la resina.</li> <li>• La posible competencia entre metales pesados y otros cationes.</li> <li>• Las resinas no son muy tolerantes al cambio en pH.</li> <li>• Los materiales orgánicos pueden envenenar la resina.</li> <li>• La solución contaminada debe de ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión.</li> </ul>
osmosis inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos niveles de remoción.</li> <li>• Es un proceso fácilmente automatizado.</li> <li>• No hay cambio en la composición química de las aguas residuales.</li> <li>• La recuperación de metales pesados es posible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mediana selectividad y tolerancia a cambios de pH.</li> <li>• Bajo tiempo de vida con soluciones corrosivas.</li> <li>• Requiere de presiones muy altas para su funcionamiento.</li> <li>• Requiere de mantenimiento frecuente para evitar saturación de la membrana.</li> <li>• Alto costo por reemplazar la membrana.</li> <li>• Es necesario separar las partículas insolubles o en suspensión para evitar saturación de las membranas.</li> </ul>
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente efectivo a muy bajas concentraciones de metal.</li> <li>• Fácil de operar.</li> <li>• Permite la fijación de metales en presencia de otros cationes.</li> <li>• La recuperación de metales pesados es posible.</li> <li>• El adsorbente puede ser regenerado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo del adsorbente y su regeneración pueden ser muy altos.</li> <li>• La capacidad de adsorción es altamente dependiente del pH.</li> <li>• Es necesario eliminar los materiales en suspensión antes de que el efluente sea tratado.</li> </ul>

La remoción y recuperación de metales pesados de efluentes líquidos por el mecanismo de biosorción ha sido mencionado en varias publicaciones utilizando diferentes combinaciones de metales y biosorbentes. Sus ventajas más evidentes en comparación con los métodos tradicionales son:

- Uso de materiales renovables que pueden ser producidos a bajo costo.
- Alta capacidad para acumular iones metálicos de manera eficaz y rápida.

Capacidad de tratar grandes volúmenes de agua contaminada debido a la rapidez del proceso.

- Alta selectividad en relación a metales específicos.
- Capacidad de manipular varios metales pesados y mezclas de residuos.
- Gran reducción en el volumen de los residuos peligrosos producidos.
- Bajo capital invertido.
- Actúa bajo un amplio rango de condiciones fisicoquímicas incluyendo temperatura, pH y presencia de otros iones.

## Bibliografía

Barriada, J. L., Caridad, S., Lodeiro, P., Herrero, R., & de Vicente, M. E. S. (2009). *Physicochemical characterisation of the ubiquitous bracken fern as useful biomaterial for preconcentration of heavy metals. Bioresource technology, 100(4), 1561-1567.*

C. Tejada-Tovar, A. Villabona-Ortiz y L. Garcés-Jaraba, "Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico", Tecno Lógicas, vol. 18, no. 34, pp. 109-123, 2015.

C. Tejada, A. Herrera, C. Ruíz, "Utilización de biosorbentes para la remoción de níquel y plomo en sistemas binarios", Ciencia y desarrollo; Vol 7, No 1. 2016.

C. Tejada, E. Ruiz, J. Gallo, J. Moscote, "Evaluation of the biosorption with african palm bagasse for the removal of Pb (II) in solution", Prospect, Vol 13, N° 1, 59-67, 2015.

Cardona-gutierrez *et al.* (2013). *Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II)* . Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán , Vol. 17, 9.

Fitzsimmons y Burrill, 1993. *Western Bracken Fern*. Washington State University: Weeds.

Finžgar N., Leštan N., Multi-step leaching of Pb and Zn contaminated soils with EDTA. *Chemosphere*, 66, 824-832 (2007).

Geary M (2008). Plant Data Sheet Pteridium Aquilinum (Breacken Fern) <<http://courses.washington.edu/esrm412/protocols/PTAQ.pdf>[www.jkeates.freemove.co.uk/bracken.pdf](http://www.jkeates.freemove.co.uk/bracken.pdf)>

Katsou E., Malamis S., Tzanoudaki M., Haralambous K.J., Loizidou M., Regeneration of natural zeolite polluted by lead and zinc in wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials*, 189, 773-786 (2011).

Larenas-Uría y Andrango. 2008. *Estudio isotérmico de biosorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales*. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador.

Liñán Montes, Garza Treviño, Chávez Gausin, Montalvo Herrera, García Gómez, Garza González “*BIOSORCIÓN DE PLOMO, ROJO CONGO Y AZUL DE METILENO CON LAS BIOMASAS Opuntia leptocaulis, RESIDUOS DE MALTA Y AGAVE*”, 2010.

Macario M., P.; Sánchez P., L.; Romero M. M. 2006. *Método de restauración de áreas invadidas por el helecho Pteridium aquilinum (L.) Kuhn en el sur de Quintana Roo*. Ecology in an Era of Globalization: Challenges and Opportunities for Environmental Scientists in the Americas. Mérida Yucatán.

Marín (2011) *Aportes al conocimiento de las plantas tóxicas para el ganado en la provincia de Jujuy* (2011). 284 38 – 49. Dirección Provincial De Desarrollo Ganadero De Jujuy: Revista Veterinaria Argentina.

Pamakcu AM and Price JM (1969) Introduction of urinary bladder cancer in rats by feeding bracken fern (*Pteridium aquilinum*). J Natl Cancer Inst 43: 275–281

Puigdomenech I., Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms (MEDUSA), Inorganic Chemistry, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2004).

Somerset V., Petrik L., Iwuoha E., Alkaline hydrothermal conversion of fly ash precipitates into zeolites 3: The removal of mercury and lead ions from wastewater. Journal of Environmental Management, 87, 125-131 (2008).

SEMARNAT.<<http://www.semarnat.gob.mx/pfnm/PteridiumAquilinumSbspPubescens.html>>

TREJO,M. GARCIA, B. y SEGOVIA,A. (2008). “Helechos Invasores y Susesión Post-Fuego” en El Journal UNAM, vol. 85, p. 19-25

Vijayaraghavan, K., Jegan, J., Palanivelu, K., and Velan, M. 2005. Batch and column removal of copper from aqueous solution using a brown marine alga *Turbinaria ornate*. Chemical Engineering Journal, 106:177-184

Villalobos-Salazar J, Mora J, Menenses A and Pashov B (1995) The carcinogenic effect of bracken spores, presented at Bracken, an Environmental Issue, University of Wales, Aberystwyth: 102–103

Volesky, B., 2001. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy* 59, 203–21

Wang S., Peng Y., Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Engineering Journal*, 156, 11-24 (2010).

Identificación y Caracterización de Sitios Contaminados con Residuos Peligrosos. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. México D. F. 2000.

CARTES INDO, P. (2005). Dinámica de selenio en el sistema suelo-planta: evaluación de un sistema praterse modelo. Dinámica de selenio en el sistema suelo-planta: evaluación de un sistema praterse modelo. Temuco, Chile: Instituto de agroindustria y universidad de la frontera.

Carro, L., Herrero, R., Barriada, J. L., de Vicente, S., & Manuel, E. (2009). Mercury removal: a physicochemical study of metal interaction with natural materials. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 84(11), 1688-1696.

Macario M., P. A. 2003. *Efecto del cambio en el uso del suelo sobre la selva y estrategias para el manejo sustentable de la vegetación secundaria en Quintana Roo*. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán. 183 pp.

López-García, M., Lodeiro, P., Barriada, J. L., Herrero, R., & de Vicente, M. E. S. (2010). Reduction of Cr (VI) levels in solution using bracken fern biomass: Batch and column studies. *Chemical Engineering Journal*, 165(2), 517-523.

Landrigan PJ, Boffetta P, Apostoli P. The reproductive toxicity and carcinogenicity of lead: A critical review. *Am J Ind Med*. 2000; 38(3): 231-43.

Prasad, M.N.V. and Freitas, H.M. 2003. Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. Electronic Journal of Biotechnology. Vol.6 No.3

Pinzón, R., & Rubiano, A. ESTUDIO PRELIMINAR DE PTERIDIUM AQUILINUM  
Constituyentes químicos y acción toxicológica.

IMP, INE Y SEMARNAT. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. México D. F., México.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA (2013). Como Citar Artículos Académicos

<<https://www.upv.es/entidades/ADE/infoweb/fade/info/U0655397.pdf> > [Consulta: 18 de Marzo 2015].