



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Obtención de datos experimentales para el diseño de un Humedal
Artificial a escala laboratorio que depure suelo contaminado con
lindano

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

OJEDA MEJÍA JORGE



México, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

PRESIDENTE: DRA. LETICIA MA. DE LOS ANGELES GONZÁLEZ ARREDONDO

VOCAL: DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

SECRETARIO: DRA. HILDA ELIZABETH CALDERÓN VILLAGÓMEZ

1^{er} SUPLENTE: DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

2^{do} SUPLENTE: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

Lugar donde se desarrolló el tema:

Esta tesis de licenciatura se realizó en el Laboratorio de Microbiología Experimental, en el Departamento de Biología de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Asesor del tema:

Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

Sustentante:

Jorge Ojeda Mejía

Agradecimientos

De antemano agradezco el gran apoyo, dedicación, conocimientos, sencillez y amistad del Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por brindarme los recursos necesarios para la realización de este trabajo.

Al Dr. Luis Alfredo Ortega Clemente por sus consejos y comentarios que me apoyaron en este proyecto.

A mis sinodales, la Dra. Leticia Ma. De los Ángeles González Arredondo, a la Dra. Hilda Elizabeth Calderón Villagomez, al Dr. José Agustín García Reynoso y al Dr. Alfonso Durán Moreno.

A la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México por haber permitido formarme en sus instalaciones.

A Edgar, a Patricia, y todos los que me ayudaron durante la elaboración de este trabajo, agradezco todo el apoyo y conocimientos. A los compañeros del Laboratorio de Microbiología Experimental de la Facultad de Química de la UNAM por permitirme compartir tiempo con ellos.

Dedicatorias

En principio, quiero agradecer académicamente a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la educación y los conocimientos adquiridos durante mi Licenciatura de Ingeniera Química. A la Facultad de Química por la oportunidad.

Agradezco indudablemente a mi familia, principalmente a mis padres, Esperanza Mejía Ramírez y Nicolás Ojeda Ortega; que siempre se esforzaron en que lograré este sueño, y por todas las cosas que me han dado durante mi vida.

A mis hermanos, Marco Antonio y Miguel Angel, por su apoyo incondicional.

A Marlene por ser siempre la mujer de la que me enamoré desde el primer día y por siempre estar a mi lado. Te amo.

A mi cuñada Susana López por su apoyo e incondicionalidad.

A todos y cada uno de mis sobrinos, por compartir su niñez conmigo.

A mis suegros por el apoyo tan grande que he recibido.

Especialmente a todos aquellos que de alguna manera ayudaron a lograr esta meta.

Y finalmente, a mis demás hermanos, les agradezco lo vivido y la intensidad de lo compartido, mis hermanos "*forevers*": Miguel (huerta), Carlos (chino), Ernesto (neto), Leopoldo (pit bull), Erick (enanote), Valter (Gral.), Alberto (comandante), Jorge (güerazo), Fernando (palencia), Sinhué (clón), Julio Cesar (shagy), Josué (flies), Omar (lucas), Daniel (pollazo), Edgar (rex), Miguel (rá), César (shimitzu), Burgués, Tania (forever), Azucena (azu), Sandra (cosa), Claudia (clausen), Gonzalo (el tío), y todos los que me faltaron de mencionar y no por eso menos importantes...

Hermanos

*En verdad os digo:
todos son mis hermanos, pero hay muy pocos buenos,
un montón de malos
y algunos que no parecen seres humanos.*

*Mi hermano es un ser limpio, pero fuerte; incansable,
sano, grave, sereno, introvertido,
justo, medido, simple, decidido.*

*Esos que miro no son mis hermanos.
Dejan darse palmadas en la espalda,
simulan la alegría que nunca han construido
y limpian los zapatos de cualquiera.*

*Yo pienso, si es que existo, que mi hermano
tiene las cartas, todas, en la mano.
Son mis hermanos gente bien parida:
fuertes, capaces, limpios. Decidida.
Estos que estoy mirando venderían, si hubiera modo,
el aire que respiran.*

*Los que no han conocido más que el barro desnudo
en que se fundan;
los que no guardan solamente odio en su corazón
y son, por ello, el doble de un hombre;
los que no ignoran de qué cosa está hecho el amor;
que no llevan las manos bocarriba
aunque traigan el alma bocabajo,
son mis hermanos.*

*Los que visten con jirones de banderas;
los que guardan solamente odio en sus corazones
y son por ello, nada más, la mitad de un hombre;
los que desangran a los hijos ajenos;
los que toman sentados el jugo de la tierra
y ponen precio a las cabezas, esos no son mis hermanos.*

*Los que levantan la frente y dicen;
los que levantan la cabeza y piensan;
los que juntan su sangre
con la otra, ya viva, de su hermano;
aquellos que no se engañan con el brillo de una cuenta de vidrio
ni con el brillo de una falsa esperanza;
los que piensan que un sol
-un solo hermano muerto-
es digno del recuerdo;
los que tomen venganza,
esos, más que seguramente,
levantarán la casa.*

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	VII
1 Introducción.....	1
2 Objetivos.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos particulares.....	4
2.3 Estrategia de trabajo.....	5
3 Marcoteórico.....	7
3.1 Plaguicidas.....	7
3.2 Clasificación toxicológica de plaguicidas organoclorados.....	9
3.3 Plaguicidas en suelo.....	11
3.4 Lindano.....	13
3.4.1 Propiedades químicas y físicas del lindano.....	13
3.4.2 Usos del lindano.....	16
3.4.3 Lindano en México.....	17
3.4.4 Transporte ambiental y ecotoxicidad.....	18
3.4.5 Dinámica y distribución de lindano en el ambiente.....	19
3.4.6 Lindano en aire.....	20
3.4.7 Lindano en agua.....	20
3.4.8 Lindano en suelos.....	21
3.4.9 Manejo y disposición de lindano.....	24
3.5 Ventajas de la incineración.....	24
3.6 Biorremediación.....	27
3.6.1 Fitorremediación.....	28
3.6.2 Fitorreactores.....	31
3.7 Componentes de fitorreactor.....	32
3.7.1 Agua.....	32

3.7.2 Especie vegetal.....	33
3.7.3 Suelo o soporte.....	34
3.8 Humedales artificiales	36
3.8.1 Tipos y características.....	36
3.8.2 Sistemas de flujo subsuperficial “FSS”	36
3.8.3 Sistema de flujo libre superficial ““HAFLS””	38
3.8.4 Los humedales artificiales flujo libre superficial	39
(ventajas y desventajas).....	39
3.8.5 Fitorreactores y humedales artificiales (Similitudes)	41
3.9 Procesos de remoción.....	42
3.9.1 Procesos físicos.....	42
3.9.2 Procesos biológicos.....	42
3.9.3 Proceso químicos	43
4 Materiales y métodos	45
4.1 Área de estudio	45
4.2 Características de los componentes del fitorreactor experimental	45
4.2.1 Suelo.....	45
4.2.2 Agua desionizada	46
4.2.3 Componente vegetal.....	46
4.2.4 Lindano	51
4.3 Diseño del fitorreactor experimental.....	52
4.3.1 Construcción e instalación del fitorreactor.....	53
4.3.2 Colocación de lindano en el fitorreactor.....	54
4.3.3 Colocación de especies vegetales en el fitorreactor	54
4.4 Pruebas en equipo experimental instalado.....	55
4.4.1 Etapa de arranque del fitorreactor experimental.....	56
4.4.2 Pruebas operativas.....	56

4.4.3	Análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos	56
4.4.4	Prueba de adsorción-desorción del lindano en suelo.....	57
4.4.5	Isoterma de adsorción	57
4.4.6	Isoterma de desorción	57
4.5	Desarrollo del modelo.....	58
4.6	Prueba de bioacumulación a especie vegetal.....	59
4.7	Extracción vegetales.....	60
4.8	Determinación de lindano.....	62
5	Análisis de resultados	64
5.1	Resultados de parámetros fisicoquímicos	66
5.1.1	Determinación de pH.....	66
5.1.2	Determinación de textura	67
5.1.3	Determinación de humedad en suelo	68
5.1.4	Determinación de materia orgánica en suelo.....	69
5.2	Resultados de parámetros de adsorción y desorción en suelos	70
5.3	Resultados del análisis y cuantificación de lindano en especies vegetales	72
5.4	Conclusiones.....	79
5.5	Recomendaciones	80
6	Bibliografía.....	81
7	Anexos.....	88
	Anexo 1 Selección de especie vegetal.....	88
	Anexo 2 Análisis del ensayo de adsorción-desorción.....	89
	Anexo 3 Análisis fisicoquímico.....	93
	Anexo 4 Esquema de incinerador.....	105
8	Hoja de seguridad del lindano	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia de las etapas de experimentación.....	6
Figura 2. Vías de exposición de plaguicidas presentes en el ambiente	13
Figura 3. Usos autorizados de lindano en empresas en México	16
Figura 4. Fitorremediación	30
Figura 5. Esquema de fitorreactor con sus componentes.....	32
Figura 6. Esquema de componente vegetal emergente.....	33
Figura 7. Especies vegetales en un Humedal Artificial.....	34
Figura 8. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal	37
Figura 9. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial	38
Figura 10. Sistema de flujo libre superficial	39
Figura 11. <i>Typha dominguensis</i>	47
Figura 12. <i>Sagittaria lancifolia</i>	48
Figura 13. <i>Echinochloa pyramidalys</i>	49
Figura 14. Reactivo Lindano	51
Figura 15. Características del fitorreactor experimental	52
Figura 16. Diseño del fitorreactor	53
Figura 17. Selección y aclimatación del componente vegetal	54
Figura 18. Instalación del fitorreactor en LMBE, Facultad de Química UNAM.....	55
Figura 19. Isoterma de adsorción-desorción	59
Figura 20. Liofilizador Thermosavant.....	62
Figura 21. Horno de Microondas "Cem Modelo Mars USA"	62
Figura 22. Cromatógrafo de gases. "Trace Ultra"	63
Figura 23. Extracción de muestras para inyección al Cromatógrafo.....	63
Figura 24. Propuesta de Humedal Artificial "HAFLS" a escala laboratorio.....	76
Figura 25. Flujo del Humedal Artificial "HAFLS" a escala laboratorio	77
Figura 26. Propuesta de Humedal Artificial "HAFLS" a escala laboratorio.....	78

Figura 27. Escala de pH	94
Figura 28. Triangulo de textura del sistema de clasificación de la USDA	104
Figura 29. Esquema del Horno de procesamiento de cemento.....	105
Figura 30. Hoja de seguridad de Lindano.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas 1. Plaguicidas prohibidos en Estados Unidos, Canadá y autorizados en México	8
Tablas 2. Principales plaguicidas organoclorados	9
Tablas 3. Clasificación de plaguicidas organoclorados.....	10
Tablas 4. Toxicidad de plaguicidas en agua y suelo	11
Tablas 5. Persistencia de plaguicidas en suelo	12
Tablas 6. Propiedades de lindano	14
Tablas 7. Empresas autorizadas para usar lindano.....	17
Tablas 8. Usos registrados de lindano en México, Canadá y Estados Unidos	22
Tablas 9. Países que han restringido severamente el uso del lindano.....	23
Tablas 10. Temperatura de combustión para plaguicidas representativos	26
Tablas 11. Ventajas y desventajas de tecnologías de remediación.....	27
Tablas 12. Tipos y procesos de fitorremediación.....	29
Tablas 13. Plantas de uso frecuente en Humedales Artificiales.....	51
Tablas 14. Bioacumulación del lindano en especies vegetales.....	65
Tablas 15. Determinación de pH	66
Tablas 16. Determinación de textura	67
Tablas 17. Determinación de humedad en suelo.....	68
Tablas 18. Determinación de Materia orgánica.....	69
Tablas 19. Curva Tipo	75
Tablas 20. Concentración de lindano (Ensayo de Adsorción mg/L.....	89
Tablas 21. Concentración de lindano (Ensayo de desorción mg/L).....	90

Tablas 22. Bioacumulación en especies vegetales (mg de lindano/kg de planta).....	91
Tablas 23. Bioacumulación de lindano en raíz (mg de lindano/kg de planta)	91
Tablas 24. Bioacumulación de lindano en tallo (mg de lindano/kg de planta).....	92
Tablas 25. Bioacumulación de lindano en hoja (mg de lindano/kg de planta)	92
Tablas 26. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH	95
Tablas 27. Categoría de muestra de suelo (mmhos/cm)	98

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Bioacumulación.....	61
Gráfica 2 Adsorción de lindano.....	68
Gráfica 3 Isoterma de Adsorción-Desorción.....	68
Gráfica 4 Bioacumulación de lindano en 3 especies vegetales (<i>mg lindano/kg planta</i>).....	69
Gráfica 5 Bioacumulación en raíz de tres especies vegetales (<i>mg lindano/kg planta</i>).....	70
Gráfica 6 Bioacumulación en tallo de dos especies (<i>mg lindano/kg planta</i>).....	71
Gráfica 7 Bioacumulación de lindano en hoja.....	71

RESUMEN

El presente estudio se enfocó a la obtención de datos experimentales útiles para el diseño de un humedal artificial tipo sistema de flujo libre superficial "HAFLS", a escala de laboratorio que depure suelo contaminado con lindano (1,2,3,4,5-6 hexaclorociclohexano) bajo condiciones controladas. Por ello, se realizaron ensayos de adsorción-desorción del lindano en suelo y se trabajó con concentraciones de 0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0 y 7.0 mg/L de lindano a efecto de determinar la capacidad de bioacumulación en la planta. Previamente, se realizaron pruebas fisicoquímicas de pH, textura, conductividad hidráulica y materia orgánica. Posteriormente, se efectuó el ensayo con el suelo ya caracterizado.

Las especies vegetales empleadas fueron: *Typha dominguensis*, *Echinochloa pyramidalys* y *Sagittaria lancifolia*, las cuales se eligieron por ser especies acuáticas, herbáceas, enraizadas a poca profundidad, se extienden rápidamente llegando a ser dominantes, excluyendo así, a otras especies nativas del humedal. El arreglo experimental consistió en un medio de soporte conteniendo la especie vegetal, variando la concentración de lindano, para seguir una cinética de 18 días de exposición con retiro de la especie vegetal cada 3 días.

La bioacumulación se determinó a los 3, 6, 9, 12, 15 y 18 días, pudiéndose así conocer en porcentaje de remoción del lindano, por el componente vegetal. Está información es importante para el diseño, instalación y operación del humedal artificial. Por este motivo, se planteó determinar, en fitorreactores a escala de laboratorio, el porcentaje de remoción de lindano presente en suelo, encontrando que la mayor remoción de lindano la realiza *Sagittaria lancifolia* con 48%, después *Typha dominguensis* con 44% y por último, *Echinochloa pyramidalys* con 43%.

Se realizó un balance másico en los fitorreactores para determinar la ruta de lindano en el suelo y la planta, el cual muestra que la mayor remoción de lindano se presentó en *S. lancifolia* con 3.41 mg de lindano/kg de planta. Se determinó que el suelo adsorbe 3.59 mg de lindano por kilogramo, mientras que *Typha dominguensis* solo 3.10 de lindano/kg de planta, mientras que para

el suelo fue de 3.9 mg de lindano/kg. En el caso de *Echinochloa pyramidalys*, la adsorción fue de 3.03 mg de lindano/kg de planta y para el suelo de 3.21 mg de lindano por kilogramo. Finalmente, se propuso un diseño básico para un "HAFLS" que, bajo condiciones controladas de laboratorio, depure suelo contaminado con lindano y opere de manera eficiente. Este sistema deberá incluir un mínimo de 4 ejemplares de *S. lancifolia* por metro cuadrado, para depurar el gasto de alimentación que será de 3.47×10^{-5} L/s para lograr un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 3 días a una concentración de 7 mg de lindano/L de agua.

1 INTRODUCCIÓN

Las alteraciones que el ambiente ha sufrido a razón de la actividad industrial y humana, son ya notables y peligrosas. El desarrollo industrial, la explotación agropecuaria y el crecimiento demográfico, dan lugar a la aparición de emisiones y residuos tóxicos que constituyen una creciente amenaza. Estos daños se traducen en cambios que afectan la calidad de vida y la salud de los seres vivos debido a alteraciones en aire, suelo, agua, así como ambientes urbanos y rurales.

El estudio de los contaminantes que afectan el hábitat terrestre, y la aplicación de técnicas y procedimientos para su monitoreo, prevención y remediación, son actualmente consideradas un área de oportunidad científico-tecnológicas.

La agricultura provee los alimentos necesarios para la gran población mundial pero para lograr esto, son liberados al ambiente una gran cantidad de sustancias para eliminar plagas que afectan cultivos. Asimismo, hay que fertilizar el terreno y eliminar la cobertura original mediante el uso de herbicidas.

Cuando se cambia el uso de suelo y régimen hidrológico, se crea un hábitat donde la proliferación de insectos nocivos va en aumento, los que serán posteriormente eliminados con insecticidas. Las raíces, frutos y hojas de los cultivos pueden ser atacados por todo tipo de insectos (vertebrados e invertebrados), por lo que para reducirlos o eliminarlos se usan rodenticidas, acaricidas y nematocidas. Asimismo, cuando la presencia de hongos no es económicamente positiva, existe la necesidad de eliminarlos mediante la aplicación de fungicidas. El método de control de plagas más explotado se basa en los productos agroquímicos, sin tomar en consideración los efectos colaterales que trae consigo su uso excesivo.

Por lo anterior, el uso de plaguicidas ha ido en aumento, así como sus efectos tóxicos no deseados en los agroecosistemas. La actividad que ejerce tiene una amplia zona de influencia, debido principalmente, a que el plaguicida se

transporta muy fácilmente en el ambiente. De esta manera, los ecosistemas naturales reciben los remanentes de los plaguicidas usados en los cultivos. El destino final de los mismos, está influenciado fuertemente por la afinidad que tengan al agua, suelo, aire o biota (Calamari y Barg, 1993).

En el caso del lindano, existe una agravante debido a que no existen aplicaciones posibles para el 80% de los subproductos de reacción generados por la producción de lindano. Si bien existen algunos métodos de transformación de estos residuos, como la deshidrocloración, que lleva a la formación de triclorobenceno y ácido clorhídrico, la demanda de estos productos es muy limitada. El triclorobenceno puede ser utilizado para la producción del herbicida ácido 2,4,5-T y del insecticida Bromophos, sin embargo, ambos han sido prohibidos o se han dejado de usar.

En consecuencia, durante los últimos 50 años, la mayor parte de los residuos han sido desechados, y actualmente se encuentran contaminando el suelo de regiones inundadas; sitios en donde los residuos han sido esparcidos por el viento debido a que fueron almacenados en grandes áreas sin recubrimiento, presencia de basureros legales e ilegales, o mezclados con basura doméstica. La disposición de estos residuos se ha vuelto un problema cada vez más complejo en la medida en que los costos ambientales que su manejo entraña han aumentado de forma considerable.

Es importante enfatizar que, por cada tonelada de lindano producida, se obtienen de 8 a 9 toneladas de residuos que no tienen actividad insecticida, poseen muy bajo (o nulo) valor comercial y son potencialmente contaminantes.

Considerando que el lindano eventualmente llega al ambiente mediante su incorporación al agua y que un ecosistema es susceptible de ser dañado, es necesario proponer alternativas de solución que permitan aminorar los efectos adversos que ocasiona la interacción del plaguicida con ese tipo de ecosistema, como los humedales naturales. Cabe señalar que, los humedales naturales son zonas de transición entre el ambiente terrestre y acuático que sirven como enlace dinámico entre los dos, y contienen una amplia

biodiversidad entre las que destacan los diversos estadios larvarios y juveniles de microorganismos importantes de la cadena alimentaria, por lo cual, es importante su protección y conservación.

Tomando en cuenta que el agua, que es uno de los vehículos de transporte de contaminantes en donde se asimila una amplia variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, los cuales a su vez se transforman o transportan a los alrededores del paisaje, es posible visualizar la aplicación de dichos ecosistemas en el tratamiento de contaminantes hidrosolubles. Por este motivo, es común que humedales naturales se encuentren ubicados en zonas de captación de agua que pueden recibir muchos de los escurrimientos de las zonas vecinas.

De manera particular, los humedales de flujo libre superficial "HAFLS" constituyen una alternativa al problema de contaminación de suelos y agua ocasionados por el uso de lindano, los cuales han demostrado poseer capacidad depuradora de aguas residuales domésticas e industriales. Sin embargo, se desconoce si tienen capacidad para remover lindano y, en su caso, si el componente vegetal que lo conforma juega un papel importante en su eliminación.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Obtener datos experimentales para el diseño de un humedal artificial sistema de flujo libre superficial “HAFLS”, a escala de laboratorio que depure suelo contaminado con lindano.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar, en fitorreactores a escala de laboratorio, el porcentaje de remoción de lindano contenido en suelo.
- Realizar un balance másico en los fitorreactores para determinar la ruta de lindano en suelo y componente vegetal.
- Determinar cuál de las tres especies vegetales empleadas es la que remueve más lindano.
- Proponer el diseño de un “HAFLS” para la depuración de suelo contaminado con lindano.

2.3 ESTRATEGIA DE TRABAJO

Considerando que la finalidad del presente trabajo fue obtener datos útiles para el diseño de un “HAFLS” que pueda eliminar lindano presente en suelo, se realizaron ensayos en fitorreactores de acuerdo a lo indicado en la Figura 1. Se espera que, operándolos bajo condiciones controladas, sea posible obtener los datos necesarios que permitan definir la especie vegetal que posea mejor capacidad de remoción del lindano contenido en suelo. Dicha información, permitirá enriquecer los criterios operativos relacionados con este tipo de reactores, con lo cual se maximizará su rendimiento, reduciendo con ello los costos operativos y de mantenimiento.

La caracterización de suelo se hizo evaluando pH, temperatura, conductividad hidráulica, materia orgánica y textura, y el periodo de experimentación fue de 2 meses.

Para la obtención de esta información se tomará en cuenta lo siguiente:

- 1) Tiempo de operación del sistema (18 días).
- 2) Tiempos de muestreo (cada tercer día).
- 3) Extracción y cuantificación de lindano contenido muestras de las especies vegetales (raíz, tallo y hoja), suelo y agua.

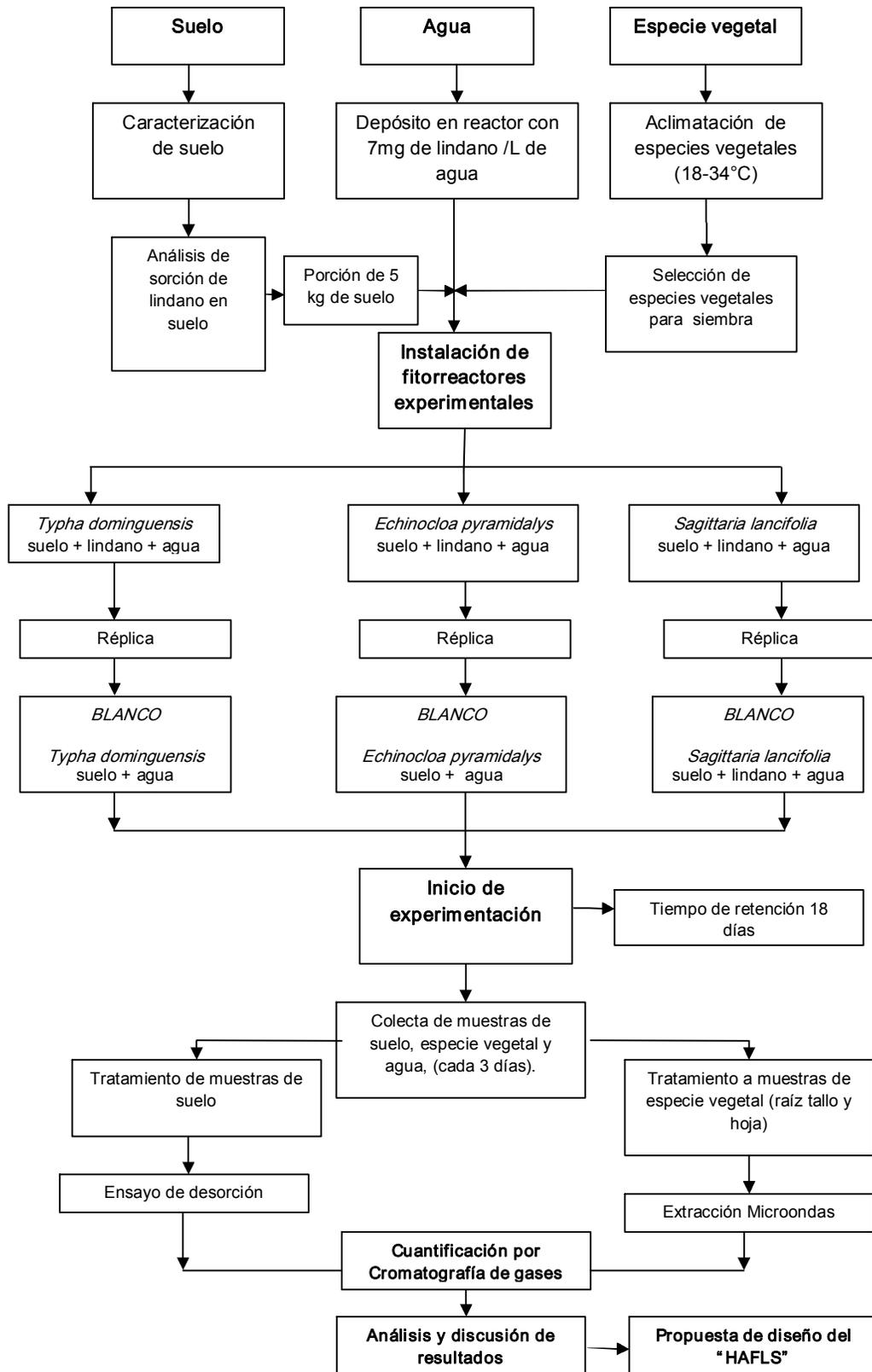


Figura 1. Secuencia de las etapas de experimentación

3 MARCO TEÓRICO

3.1 PLAGUICIDAS

El desarrollo masivo de la agricultura y la agroindustria, dio por resultado el uso excesivo de plaguicidas, sobre todo a partir de la década de 1950. Los plaguicidas tienen a menudo propiedades mutagénicas, teratogénicas y cancerígenas en los animales y el humano. Los distintos plaguicidas se caracterizan principalmente por que se acumulan en agua y principalmente en suelos. (De la Vega-Salazar *et al.*, 1997).

El estudio de los plaguicidas es uno de los más complejos de nuestra época. Se han llevado a cabo muchas investigaciones, estudios científicos y tecnológicos sobre la materia en los últimos 25 años, en que se ha presentado simultáneamente, un auge en los estudios ambientales (García, 1997).

Se denomina *plaguicida* a cualquier compuesto o mezcla de compuestos que se destina a controlar cualquier plaga, incluidos los vectores de enfermedades, así como las especies no deseadas que causen perjuicio o que interfieran con la producción agrícola, pecuaria y forestal, (Semarnap-INE, 1999).

Pese a que en México actualmente está prohibido el uso de plaguicidas y herbicidas considerados contaminantes orgánicos persistentes (COP), los efectos de aquellos que fueron empleados en los años 40 y 50 para la siembra y el cultivo de caña de azúcar, aún permanecen en el ambiente, lo que se manifiestan en problemas a la salud como la propensión al cáncer o los trastornos hormonales. (De la vega-Salazar 1997; Boone y James, 2003, Zaga *et al.*, 1998).

En México se usa el 60% de los 22 plaguicidas marcados como perjudiciales para la salud y el ambiente, de ellos, el 42% se fabrican en el país. De 90 plaguicidas que están restringidos en los Estados Unidos, 30 de ellos se usan en México (Semarnap-INE. 1999).

En la Tabla 1 se presentan algunos de los plaguicidas más utilizados en la agricultura (prohibidos en Estados Unidos y Canadá pero autorizados en México), con una toxicidad aguda elevada.

Tablas 1. Plaguicidas Prohibidos en Estados Unidos y Canadá y autorizados en México

Plaguicidas		
Alaclor	Fosfamidón	Ometoato
Azinfos-Metílico	Forato	Oxyfluorfen
Aldicarb	Kadetrina	Paraquat
Captan	Linuron	Pentaclorofenol
Captafol	Maneb	Quintoceno
Carbarilo	Metamidofos	Sulprofos
Clordano	Metidation	Triazofos
DDT	Metil-Parathion	Tridemorf
Diurón	Metoxicloro	Vamidotion
Dicofol	Mevinfos	2,4-D
Endosulfán	Monocrotofos	<i>Lindano</i>

Fuente: INE, 2004.

3.2 CLASIFICACIÓN TOXICOLÓGICA DE PLAGUICIDAS ORGANOCLORADOS

Los plaguicidas organoclorados son sustancias que presentan cloro en su composición y que afectan el sistema nervioso. Agrupan a un considerable número de compuestos sintéticos, cuya estructura química corresponde a los hidrocarburos clorados (Tabla 2). Algunos plaguicidas organoclorados son de los compuestos más persistentes en el ambiente; son liposolubles de baja solubilidad en agua y elevada solubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos. Tienen estructura cíclica, poseen baja presión de vapor, alta estabilidad química, notable resistencia al ataque de los microorganismos y tienden a acumularse en el tejido graso de los organismos vivos acumulándose en el suelo. Pueden ingresar a los organismos vivos por ingestión, inhalación o por contacto directo con la piel. La absorción de grandes dosis se facilita cuando estos plaguicidas se encuentran disueltos en grasa animal o vegetal (Tanabe, 2004).

Tablas 2. Principales Plaguicidas organoclorados

Compuestos	Plaguicida
Aromáticos Clorados	DDT, Dicofol, Metoxicloro, Clorobenzilato
Cicloalcanos Clorados	Hexaclorociclohexano (Lindano)
Ciclodiénicos Clorados	Endrín, Dieldrín, Aldrín, Clordano, Heptacloro, Mirex
Terpenos Clorados	Toxafeno

Fuente: INE, 2004.

Tabla 3. Clasificación de Plaguicidas organoclorados

Plaguicida	Toxicidad (Humanos)	Toxicidad (Ambiental)
DDT	Hígado, riñón, sistema inmune, carcinógeno, neuronas transmisoras, teratógeno, disrruptor endócrino.	Tóxico para peces e invertebrados acuáticos, aves, persistente y bioacumulable.
Dieldrin	Hígado, neuronas transmisoras, carcinógeno, disrruptor endocrino.	Persistente y bioacumulable.
Endosulfan	Hígado, riñón, sangre, paratiroides, neuronas transmisoras mutágeno, teratógeno, disrruptor endócrino.	Persistencia variable en suelo, agua, y baja en especies vegetales, bioacumulación alta en organismos acuáticos.
Lindano	Hígado, riñón, páncreas, testículos, neuronas transmisoras, sistema inmune, carcinógeno, disrruptor endócrino.	Persistencia alta en suelo, agua, y varía en especies vegetales, bioacumulación alta en organismos acuáticos.

Fuente: INE, 2004.

Tablas 4. Toxicidad de Plaguicidas en agua y suelo

Pesticida	Tipo	Fórmula	DL₅₀ (mg/kg)
Aldrín	Organoclorado	C ₁₂ H ₆ Cl ₆	40 (extremadamente tóxico)
<i>Lindano</i>	Organoclorado	C ₆ H ₆ Cl ₆	90 (muy tóxico)
Heptacloro	Organoclorado	C ₁₀ H ₅ Cl ₇	100 (muy tóxico)
DDT	Organoclorado	C ₁₄ H ₉ Cl ₅	115 (muy tóxico)
Dieldrín	Organoclorado	C ₁₂ H ₄ OCl ₆	50 (muy tóxico)
Parathion	Organofosforado	C ₁₀ H ₁₄ NO ₅ PS	4 (super tóxico)
Metil parathion	Organofosforado	C ₈ H ₁₀ NO ₅ PS	14 (extremadamente tóxico)
Malation	Organofosforado	C ₁₀ H ₁₉ O ₆ PS ₂	1000 (moderadamente tóxico)
Carbamit	Carbamato	C ₁₁ H ₁₅ NO ₃	540 (moderadamente tóxico)

DL₅₀: indica en toxicología los miligramos de una sustancia necesarios por kilogramo de peso de un animal para matar al 50% de la población. Fuente: INE, 2004.

3.3 PLAGUICIDAS EN SUELO

Los plaguicidas en el suelo presentan diferente tiempo de persistencia, la cual depende de varios factores ambientales como temperatura, pH, aireación y contenido de sustancias orgánicas del suelo. Algunos de los insecticidas clorados pueden persistir por más de 10 años.

Cuando un plaguicida llega al suelo, éste queda sometido a diversos factores que afectan su persistencia. El lavado de los suelos, la degradación biológica y química, la adsorción por coloides, la volatilización y la absorción por los cultivos, son algunos de estos factores. El período en que un pesticida puede

encontrarse en el suelo es de gran importancia ya que refleja el tiempo en que la plaga estará sometida a control, afectando además al ambiente, favoreciendo su acumulación en especies vegetales, entre otras. En la Tabla 5, se observa la persistencia de algunos plaguicidas en suelo respectivamente.

Tablas 5. Persistencia de Plaguicidas en suelo

Sustancia	Persistencia (75 al 100%)
Plaguicidas organoclorados	
DDT	10 años en adelante
Aldrín	3 años
Clordano	5 años
Heptacloro	2 años
<i>Lindano</i>	3 años
Insecticidas organofosforados	
Diazinon	12 semanas
Malation	1 semana
Paration	1 semana
Herbicidas	
2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético)	4 semanas
2,4,5T(ácido 2,4,5, triclorofenoxiacético)	20 semanas
Dalapín	8 semanas
Atrazina	40 semanas
Simazina	48 semanas
Propazina	1.5 años

Fuente: Navarrete, 1995.

En la Figura 2, se observa las vías de exposición a los plaguicidas, presentes en el ambiente.



Figura 2. Vías de exposición de plaguicidas presentes en el ambiente

3.4 LINDANO

El *lindano* es un plaguicida organoclorado, moderadamente tóxico y puede ser peligroso para los seres humanos (Tanabe, 2004). Es altamente persistente en el ambiente, relativamente volátil; su estabilidad química y su gran afinidad con las grasas hace que se bioacumule en los tejidos ricos en ellas (Koskinen y Harper, 1990).

3.4.1 PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DEL LINDANO

El *lindano* es un compuesto organoclorado moderadamente lipofílico, caracterizado por un alto coeficiente de partición octanol-agua ($K_{ow} \approx 4 \times 10^3$), presenta una baja solubilidad en agua de $\sim 7\text{mg/L}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y carácter polar bajo debido a la fuerte electronegatividad de los átomos de Cl unidos al anillo (Prakash *et al.*, 2004).

El peligro del lindano es debido a que, como todos los organoclorados además de ser tóxico, tiene la capacidad de ser almacenado en los seres vivos (bioacumulación). Su fórmula química es $\text{C}_6\text{H}_6\text{Cl}_6$, es un sólido blanco cristalino, estable en contacto con la luz, calor, aire, bióxido de carbono y ácidos fuertes.

El lindano se asimila ingiriéndolo, respirándolo o por contacto directo, sus efectos tóxicos dependen de la cantidad de isómeros que lo formen y principalmente de la cantidad de isómero gamma que contenga, como se muestra a continuación las propiedades y características del lindano en la Tabla 6.

Tablas 6. Propiedades del lindano

Nombre común	Lindano
Otros nombres	gama-HCH, gama-HCB (más del 99% del isómero gama), gama-7796.
Nombre químico	Isómero gama de 1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano o 1-alfa, 2-alfa, 3-beta, 4-alfa, 5-alfa, 6-beta hexaclorociclohexano
Número CAS	58-89-9
Tipo químico	Hidrocarburo clorado
Punto de fusión	323.4°C
Presión de vapor	7.33×10^{-8} atm
Peso molecular	290.85
Aspecto	Sólido, cristalino, incoloro
Constante de Henry (H_c), atm.m³/mol	2.92×10^{-6}
Log K_{ow}	3.61
Densidad (g/ml)	1.87
Punto de ebullición (°C)	112.5
Solubilidad acuosa (mg/L)	7.3
Uso	Insecticida, acaricida
Modalidad	Insecticida que actúa por contacto, a través del estómago y las vías respiratorias. Estimula el sistema nervioso ocasionando convulsiones y la muerte.
Clasificación toxicológica	Organización Mundial de la Salud Ingrediente activo categoría II (moderadamente peligroso). Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer Grupo 2B (posiblemente cancerígeno, pero no hay datos suficientes para los seres humanos). Tóxico, irritante.



Fuente: Avalos y Ramírez (INE), 2003.

EFFECTOS EN LA FAUNA	
Peces	CL50: 0,02-0,09 mg/L (muy tóxico) (Organización mundial de la salud, 1991).
Abejas	Tóxico para las abejas (Pesticide Manual, 1994).
Invertebrados Acuáticos	Tóxico para los Crustáceos: 0,005-0,88 µg/L (Organización mundial de la salud, 1991).
Aves	DL50: 120-210 para la codorniz de cola blanca; toxicidad en alimentación de aves: 882 ppm para la codorniz de cola blanca, 561 ppm para el faisán de collar (moderadamente tóxico en ambos casos); >5000 ppm para el pato salvaje (toxicidad mínima).
Tipos de preparación	Concentrados emulsionables (0,45% a 40% con 11% o 12% y 20% común); concentrados fluidos (0,5%, 1,0%, 30% y 40%); polvos humectables (3%, 6%, 9%, 10%, 25%, 75%); líquidos bajo presión (0,25%, 0,75%, 3%); polvos (0,5% a 75% con 1% común); polvos fumígenos (10,2, 11,2, 20,0%); líquidos listo para empleo (0,5% a 25% con 0,1% y 0,5% común); calidad técnica (99%, 99,5%, 100%).
Nombres comerciales	666; Aalindan; Africide; Agrocide; Agrocide III; Agrocide WP; Ameisenmittel Merck; Ameisentod; Aparasin; Aphantia; Aplidal; Arbitex; BBH; Ben-Hex; Bentox; Bexol; Celanex; Chloresene; Codechine; DBH; Detmol-Extrakt; Devoran; Dol; Drill Tox-Spezial Aglukon; ENT 7796; Entomoxan; Exagamma; Forlin; Gallogama; Gamaphex; Gammalin; Gammalin 20; Gammex; Gammexane; Gammater; Gexane; Grammapox; Hecltox; Hexa; Hexachloran; γ-Hexachloran; Hexachlorane; Hexaverm; Hecicide; Hexyclan; HGI; Hortex; Inexit; Isotox; Jacutin; Kokotine; Kwell; Lacca Hi Lin, Lacca Lin-O-Mulsion; Lendine; Lentox; Linafor; Lindafor; Lindagam; Lindagrain; Lindagam; Lindagram; Lindatox; Lindasep; Lin-O-Sol; Lindagranox; Lindalo; Lindamul; Lindapoudre; Lindaterra, Lindex; Lindust; Lintox; Lorexane; Milbol 49; Msycol; Neo-Scabidol; Nexen FB; Nexit; Nexit-Stark; Nexol-E; Nicochloran; Novigam; Omnitox; Ovadziak; Owadizak; Pedraczak; Pflanzol; Quellada; Sang-gamma; Silvanol; Spritz-Rapidin; Spruehpflanzol; Streunex; TAP 85; Tri-6; Vitron

Fuente: Avalos y Ramírez (INE), 2003.

3.4.2 USOS DEL LINDANO

Por ser un plaguicida de amplio espectro, el lindano tiene usos muy variados. En México se utiliza en el sector agropecuario, veterinario e incluso en el ámbito de la salud humana. De acuerdo con los registros de la Dirección General de Sanidad Vegetal de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, el lindano está autorizado para el tratamiento de semillas de avena, cebada, frijol, maíz, sorgo y trigo. En cuanto al ganado, el lindano es utilizado como antiparasitario externo para bovinos y porcinos, siendo particularmente eficaz contra las larvas de la mosca común, ácaros de la sarna, piojos, pulgas y garrapatas; también es aplicado en algunos animales domésticos. (Lindano en México, INE 2004).

Actualmente, el uso del lindano se encuentra autorizado para la formulación de medicamentos dermatológicos. Se puede adquirir en farmacias como lindano, Benzilo, Benzoato de lindano y lindano/lidocaina. Se usa principalmente como agente para el tratamiento de la pediculosis y la escabiosis o sarna sarcóptica. La pediculosis, es causada por la infestación de piojos, mientras que la escabiosis es causada por organismos pequeños que habitan sobre la piel y que depositan sus huevecillos justo por debajo de la superficie de la dermis. (Lindano en México, INE 2004). En la Figura 3, se muestra algunos de los usos autorizados para el lindano en el país.

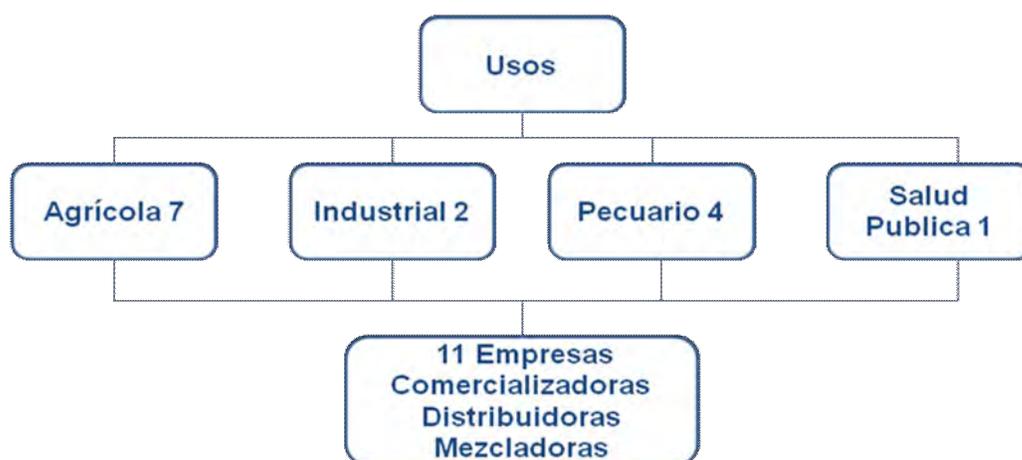


Figura 3. Usos autorizados de lindano en empresas en México

Tablas 7. Empresas autorizadas para usar lindano

Agrevo	Laboratorios Helios	Merck	Tekchem	Gustafson	Bayer
Productos Farmacéuticos	Rhone Poulenc	Ingeniería Industrial	Pfizer	Agromundo	

Fuente: COFEPRIS, 2003.

3.4.3 LINDANO EN MÉXICO

En México son limitados los estudios e investigaciones que se han realizado para determinar los efectos ambientales que ha tenido el uso del lindano en el país, lo cual no ha permitido identificar los estados de la República más afectados por el uso de este plaguicida. Sin embargo, se han reportado resultados de algunos estudios en diversas regiones del país donde se ha determinado la presencia del lindano (INE, 2004).

En investigaciones realizadas en Chiapas se encontró lindano en sedimento del sistema lagunar Carretas-Pereyra (Rueda, 1994). En Sinaloa se han identificado residuos en la bahía de Ohuira, Topolobampo y en varias lagunas costeras, muy probablemente como resultado de la liberación de lindano en regiones agrícolas cercanas.

Las concentraciones presentes son suficientes para afectar la respiración del camarón aumentando su estrés; esto puede ser parte de la causa del aumento en la mortandad del camarón en esta región. El Río Blanco, en Veracruz, también muestra la presencia de este plaguicida en sedimentos y organismos acuáticos. En el Valle del Yaqui, Sonora, igualmente se encontraron altas concentraciones de plaguicidas organoclorados en suelo, entre ellos el lindano (Cámara Durán, 1994).

En 1971 se realizó un estudio en el Estado de México, con el objetivo de determinar la concentración de diferentes plaguicidas organoclorados, entre ellos el lindano, en grasa de bovinos sacrificados en el rastro de ciudad Netzahualcóyotl, en el cual se detectó la sustancia en animales procedentes de los estados de Veracruz, Tabasco, Hidalgo y Puebla (Albiter, 1971).

Estos resultados permiten suponer, dado el actual uso del lindano en México, que el ganado sigue estando expuesto a este plaguicida. Aunque algunos de los niveles de lindano encontrados en los citados estudios se encuentran por debajo de los estándares internacionales de límites permisibles, siguen representando un riesgo para otras especies animales y para la población debido al proceso de biomagnificación.

3.4.4 TRANSPORTE AMBIENTAL Y ECOTOXICIDAD

El lindano y otros isómeros del hexaclorociclohexano no se encuentran de manera natural en el ambiente. La entrada de lindano en el ambiente ocurre durante su formulación y su uso como plaguicida. Sin embargo, se ha detectado existencia de hexaclorociclohexano en el aire, en las aguas superficiales y profundas, en sedimento, suelo, peces y otros organismos acuáticos, animales y humanos (INE, 2004).

El lindano se adsorbe fuertemente en suelos con alto contenido de materia orgánica, sin embargo, existen indicaciones de que la volatilización es una ruta importante de disipación bajo condiciones tropicales y altas temperaturas (Poggi-Varaldo y Rinderknecht-Seijas, 2003).

La degradación del lindano ocurre por exposición a la radiación ultravioleta, formando pentaclorociclohexanos y tetraclorociclohexenos. El periodo de degradación ambiental del lindano varía de pocos días, hasta 3 años dependiendo de varios factores, especialmente del tipo de suelo y clima (INE, 2004).

El paso del lindano del suelo a las especies vegetales es limitado, sobretodo en suelos con un alto contenido de materia orgánica, ya que ésta retiene los restos de lindano. Los residuos se encuentran principalmente en las raíces de las especies vegetales y sólo una pequeña porción es translocada a tallos, hojas o frutos (INE, 2004).

La bioconcentración en microorganismos, invertebrados, peces, aves y humanos, se lleva a cabo rápidamente, la biotransformación y eliminación también ocurren de manera rápida. Sin embargo, la bioacumulación del lindano

en los tejidos del cerebro de mamíferos marinos tiene concentraciones equivalentes o superiores a las de los contaminantes más hidrofóbicos como los bifenilos policlorados (BPC) con una toxicidad en truchas Arcoíris de: CL_{50} 2 mg/L (96 h), en pez Bagre (siluro) de: CL_{50} 8,7-139 mg/L (30 d) y el DDT de: (CL_{50} de 96 horas), 4.7 μ g/L en salmón y de 8.7 μ g/L para la trucha Arcoíris. (Hutzinger, Safe & Zitko, 1974; Crine, 1988).

El lindano tiene una estructura química muy estable, por lo que tarda años en degradarse a formas menos tóxicas. En muchos casos es difícil de degradar por los organismos porque es poco soluble en agua y tiende a acumularse en los tejidos grasos y al final de la cadena trófica (INE, 2004).

Desde el punto de vista ambiental al ser un compuesto apolar, el lindano es lipófilo, se biodegrada lentamente y es muy estable en condiciones ambientales normales. Por lo tanto, el lindano se almacena fácilmente en los seres vivos y en el ambiente, se degrada casi exclusivamente por bacterias anaerobias, por lo que, en lugares de condiciones aerobias, puede permanecer muchos años (INE, 2004).

3.4.5 DINÁMICA Y DISTRIBUCIÓN DE LINDANO EN EL AMBIENTE

Se han realizado diferentes experimentos a nivel laboratorio para entender el comportamiento y dinámica del lindano en el ambiente, obteniendo resultados que ayudan a su eliminación, sin embargo, estos resultados pueden diferir de algunos trabajos realizados en campo (Shindler, 1999; CCA, 2000). El destino y los efectos del lindano en el ambiente dependen de muchos factores, entre ellos las características y concentraciones del plaguicida, del tipo y número de fuentes de emisiones, su frecuencia de uso, dinámica del área, características de los ecosistemas y organismos expuestos.

Existen otros factores que facilitan el transporte de plaguicidas organoclorados en áreas más cálidas hacia latitudes y altitudes más altas, siendo estos la mayor radiación UV, volatilidad ligada a la temperatura, mayor condensación en las regiones más frías (Shindler, 1999; CCA, 2000).

3.4.6 LINDANO EN AIRE

Existe evidencia de que el lindano puede transportarse a grandes distancias. Por ejemplo, se han encontrado isómeros de hexaclorociclohexano en el Ártico y en el Antártico, donde no se utiliza este producto. Más aún, se considera que el lindano y sus isómeros son los compuestos organoclorados más abundantes en la atmósfera, el mar, la zona terrestre y las aguas dulces del ártico (Shindler, 1999; CCA, 2000).

Históricamente, la mayor liberación al aire ha sido por aplicación directa sobre los cultivos. Durante su manufactura, puede ser transportado a la atmósfera por volatilización de los suelos y cultivos tratados; la erosión del suelo causada por el aire contribuye a la distribución del lindano en la atmósfera. Una vez en la atmósfera, ya sea como vapor o adsorbido por partículas, puede ser degradado fotolíticamente (por acción de la luz); sin embargo, puede ser removido de la atmósfera por el efecto de la lluvia y la falta de humedad en el ambiente (Shindler, 1999; CCA, 2000).

3.4.7 LINDANO EN AGUA

El lindano tiene la capacidad de contaminar la superficie del agua por escurrimiento, ya que se transporta al ser disuelto o adsorbido por partículas, o por sedimento de lluvia o nieve. El lindano, al igual que el producto de su degradación, el isómero alfa, también ha sido detectado en aguas subterráneas donde llega debido a la lixiviación.

En estudios de laboratorio se encontró que el lindano es estable a la hidrólisis (descomposición causada por el agua) a un intervalo de pH de entre 5 y 7, y a un pH de 9, y tiene una vida promedio de 43 a 53 días (Shindler, 1999; CCA, 2000).

3.4.8 LINDANO EN SUELOS

El lindano puede ser liberado al suelo por aplicación directa o indirecta durante su formulación, almacenamiento y/o distribución. En ciertos casos, el lindano puede ser fuertemente adsorbido por suelos que contienen una gran cantidad de materia orgánica, sin embargo, puede lixiviar con agua de lluvia o riego artificial (Shindler; 1999; CCA, 2000).

La degradación del lindano en suelo no es significativa, ya que durante un experimento donde se expuso a 24 horas de luz del día durante 30 días, mostró sólo una ligera degradación por acción fotolítica (Shindler, 1999; CCA, 2000). Lo anterior, indica que el lindano no se descompone fácilmente cuando permanece en el suelo, y de ahí es transportado a la atmósfera. Es por esta razón que las emisiones más importantes del lindano en el aire se deben a las provenientes de usos agrícolas. En la Tabla 8 se presentan los usos más extendidos del lindano tanto en México como en Estados Unidos y Canadá.

Por los problemas ambientales que causa el lindano ha sido prohibido en muchos países como se muestra en la Tabla 9, entre estos países se encuentran algunos de América Central (Schafer, 2000).

Tablas 8. Usos registrados de lindano en México, Canadá y Estados Unidos

País	Usos del lindano	
México	Tratamiento de Semillas	Avena, cebada, frijol, maíz, sorgo y trigo
	Otros	Veterinario (contra parásitos externos) Salud pública (contra piojos y sarna) Urbano (contra alacranes) Suelo, en cultivos de maíz y sorgo
Canadá	Tratamiento de Semillas	Avena, brócoli, cebada, chícharo, col, col de Bruselas, coliflor, frijol, lino, maíz, mostaza, nabo, soya y trigo
	Otros	Cultivos de frutas y verduras, tabaco, plantas ornamentales, suelos de invernadero, plantas herbáceos y césped. Salud pública (shampoo contra piojos y sarna)
Estados Unidos	Tratamiento de Semillas	Acelga, apio, avena, brócoli, cebada, centeno, col, col de Bruselas, coliflor, colinabo, espinaca, lechuga, maíz, mostaza, rábano, sorgo y trigo
	Otros	Salud pública (shampoo contra piojos y sarna)

Fuente: INE, 2004.

Tablas 9. Países que han restringido severamente el uso de lindano

Países que han restringido el uso de lindano		
Dinamarca	Sudáfrica	Austria
Finlandia	Corea del Sur	Turquía
Gambia	Suecia	Kenia
Honduras	Turquía	Sri Lanka
Hungría	Colombia	Chipre
Indonesia	Costa Rica	Yugoslavia
Kuwait	Noruega	Tailandia
Nueva Zelanda	Paraguay	Singapur
Holanda	Corea	Portugal
Santa Lucía	Alemania	Uruguay
Eslovenia	Argentina	Panamá
Bulgaria	Países Bajos	Japón
Australia	<i><u>20 países más</u></i>	

Fuente: INE, 2004.

3.4.9 MANEJO Y DISPOSICIÓN DE LINDANO

La incineración a altas temperaturas puede convertir plaguicidas orgánicos en bióxido de carbono, agua, óxidos de azufre, ácido clorhídrico y otros compuestos simples. Los metales en los desechos del plaguicida no se destruyen por la incineración, y pueden ser parte de las cenizas o escoria, pueden vaporizarse y formar parte del gas de escape o pueden oxidarse y volverse cenizas, compuesto de partículas o condensado en el cañón o limpiador. Deben ser manejados con técnica de Ingeniería Química o tecnológica para el control de contaminación.

Los incineradores de horno rotativo han sido especialmente construidos en algunos países para eliminar plaguicidas y otros desechos peligrosos. Sin embargo, estos incineradores son muy caros y muchos países no lo tienen.

La incineración en un horno para cemento es un método adecuado para la disposición de muchos desechos de plaguicidas. Para producir cemento se utilizan hornos de alta temperatura y muchos países tienen por lo menos una fábrica de cemento en los cuales se pueden utilizar plaguicidas para cubrir parte de los requerimientos de combustible para su producción. En la Tabla 10 se muestra las temperaturas de combustión de algunos plaguicidas representativos. Los plaguicidas sólidos pueden ser introducidos como pastas, pero los hornos para cementos no pueden manejar grandes objetos sólidos como tambores.

3.5 VENTAJAS DE LA INCINERACIÓN

En un horno de cemento se generan temperaturas de operación de 1350°C a 1650°C con tiempos de retención de 5 a 6 segundos para los gases, y 10 a 20 minutos para los sólidos, lo que supera por un amplio margen las condiciones mínimas necesarias para una destrucción del 99.9%.

Este horno es un equipo a gran escala, incluyendo el control del proceso y de sus emisiones, por ello se requiere de poco capital adicional.

El carácter alcalino del horno limita la formación de ácido clorhídrico por la combustión de plaguicidas organoclorados y protege el equipo de la corrosión.

Las caídas instantáneas de temperatura son poco probables debido a la gran inercia térmica del horno.

Las emisiones de dióxido de azufre no aumentan con la combustión del desecho, y las emisiones de óxido de nitrógeno parecen disminuir ligeramente.

Las cenizas del plaguicida incinerado (cenizas de fondo) se incorporan al producto de escoria, eliminando problemas de disposición.

Se ha demostrado que las cenizas volátiles, o en polvo del horno, recuperados de aparatos para el control de la contaminación, son un desecho no peligroso.

La calidad del cemento es relativamente insensible a los productos de incineración de la mayor parte de los plaguicidas de desecho, aun así se logra la destrucción del 99.9 %, la concentración máxima del nivel base de una combustión de desechos plaguicidas, sería de orden de una parte por mil millones calculada para velocidades de viento de 3 a 10 m por segundo (Batstone-Smith y Wilson, EUA, 1989).

En la Tabla 10 se puede observar la temperatura de combustión de algunos plaguicidas.

Ver Anexo 4.

Tabla 10. Temperatura de combustión para plaguicidas representativos

Plaguicida	Temperatura °C de combustión completa
Aldrin	570-700
Atrazina	600-650
Captan	600
2,4-D	602
DDT	500-850
DNBP	639-656
Dieldrin	620-640
Diuron	500-775
Kepon	500
Malation	650-715
Mirex	700-850
Paraquat	592-613
Carbaril	678-724
2,4,5-T	717-731
Toxafeno	710
Triflurain	842-879
Zineb	690-840
Lindano	500

Fuente: Gudrig Huden, 1990.

3.6 BIORREMEDIACIÓN

El término *biorremediación* se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (especie vegetal, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente, de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren *et al.*, 1997).

En la Tabla 11 se presentan algunas de las ventajas y desventajas que presenta el proceso de biorremediación.

Tablas 11. Ventajas y desventajas de tecnologías de remediación

	o Ventajas	o Desventajas
➤ Tratamientos Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Son efectivos en cuanto a costos. ➤ Tecnologías más benéficas para el ambiente. ➤ Los contaminantes generalmente son destruidos. ➤ Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Requiere mayores tiempos de tratamiento. ➤ Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. ➤ No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.
➤ Tratamientos fisicoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Son efectivos en cuanto a costos. ➤ Pueden realizarse en periodos cortos. ➤ El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía e ingeniería. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumento en costos y necesidad de permisos. ➤ Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse. ➤ Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de separación.
➤ Tratamientos térmicos		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Es el grupo de tratamientos más costosos.

Fuente: Van Deuren *et al.*, 1997.

3.6.1 FITORREMEDIACIÓN

Frente a los otros tipos de biorremediación, la *fitorremediación* es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y que puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Los mecanismos de fitorremediación se incluyen en la Tabla 12 los cuales son: rizodegradación, fitoextracción, fitodegradación y fitoestabilización (Van Deuren, 1997; Hutchinson, Banks y Schwab, 2001).

La fitorremediación ofrece algunas ventajas y desventajas del proceso de biorremediación:

VENTAJAS:

- Las especies vegetales pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas. Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado (50 cm de profundidad) puede costar entre 24,000 y 40,000 USD/ha (Van Deuren, 1997; Hutchinson, Banks y Schwab, 2001).
- Algunos procesos de degradación ocurren en forma más rápido con plantas que con microorganismos.
- Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.
- Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAPs; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados, organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr (VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn. Se ha demostrado también su capacidad en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

DESVENTAJAS:

- El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces en el suelo, así como a aguas poco profundas.
- Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
- La biodisponibilidad de los compuestos o metales pesados es un factor limitante para la captación.
- El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar.
- Altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas.

Puede depender de la estación del año. No es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos. La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden mobilizarse, o bioacumularse en animales.

Tablas 12. Tipos y procesos de fitorremediación

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
➤ Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces).	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc.
➤ Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc, isótopos radioactivos, compuestos fenólicos.
➤ Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para compuestos fenólicos y clorados.
➤ Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradadores (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, antrazina, etc.
➤ Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
➤ Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), antrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles, nitrilos, etc.

Fuente: Van Deuren, 1997; Hutchinson y Schwab, 2000.

Las plantas pueden incorporar los contaminantes mediante distintos procesos que se representan en la Figura 4. Se puede observar que en el proceso interfiere desde las enzimas de los exudados de las raíces, hasta las asociaciones micorrizicas que se presentan en algunas plantas.

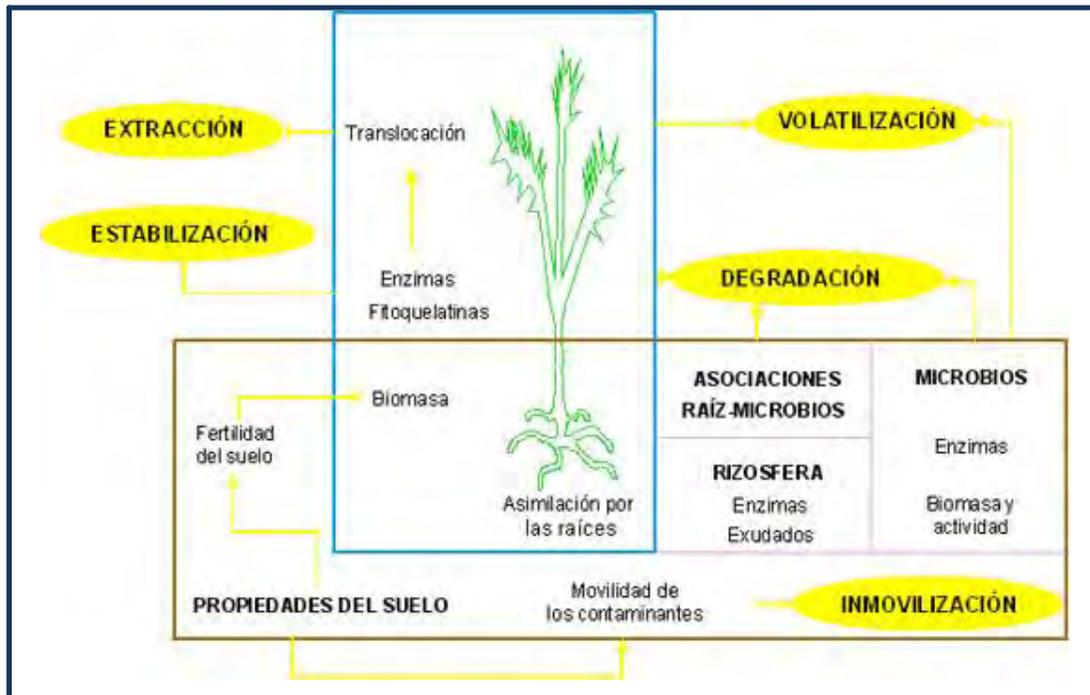


Figura 4. Fitorremediación

Se conocen alrededor de 400 especies de plantas con capacidad para hiperacumular selectivamente alguna sustancia, en la mayoría de los casos, se trata de cultivos conocidos. El girasol (*Heliantus annuus*) es capaz de absorber grandes cantidades de uranio depositado en el suelo. Los álamos del género *Populus*, absorben selectivamente níquel, cadmio y zinc. También la especie vegetal *Arabidopsis thaliana* es capaz de hiperacumular cobre y zinc. Otras especies vegetales que se han ensayado con éxito como posible especie fitorremediador en el futuro inmediato son: alfalfa, mostaza, tomate, calabaza, esparto, sauce y bambú. Incluso existen especies vegetales capaces de eliminar la alta salinidad del suelo, gracias a su capacidad para acumular cloruro de sodio.

En general, hay especies vegetales que convierten los productos que extraen del suelo a componentes inocuos o volátiles, pero cuando se plantea realizar un esquema de Fitorremediación de un cuerpo de agua o una área de tierra contaminada, se siembra la especie vegetal con capacidad (natural o adquirida por ingeniería genética), de extraer el contaminante de interés. Luego de un período de tiempo determinado se cosecha la biomasa, se incinera, o se le da otro uso dependiendo del contaminante extraído, de esta forma los contaminantes acumulados en las plantas no se transmiten a través de las redes alimentarias a otros organismos.

3.6.2 FITORREACTORES

Normalmente, estos sistemas consisten en un monocultivo o policultivo de una especie vegetal tomada de un sistema lagunar, tanques o canales poco profundos, en los cuales las especies vegetales han tenido un tiempo de contacto con el contaminante (tiempo de retención), siendo tratados además por varios procesos fisicoquímicos y bacteriológicos.

El oxígeno, necesario para la oxidación de la materia orgánica llevado a cabo por los microorganismos, es suministrado principalmente por las propias plantas del humedal que lo producen por fotosíntesis o lo toman del aire e inyectan hasta la zona radicular. La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular por parte de las plantas acuáticas, favorece también el crecimiento de bacterias nitrificantes.

Por estar el agua en continuo contacto con las plantas, en algunas ocasiones se producen malos olores y se generan lodos, que son producidos por el propio sistema. Estos sistemas tienen la ventaja de ser naturales, integrados al ambiente natural o artificial, en estos últimos a condiciones controladas, que eliminan los sólidos en suspensión, la materia orgánica, los elementos eutrofizantes y los microorganismos patógenos. Desde un punto de vista económico, tienen un reducido costo de instalación y mantenimiento.

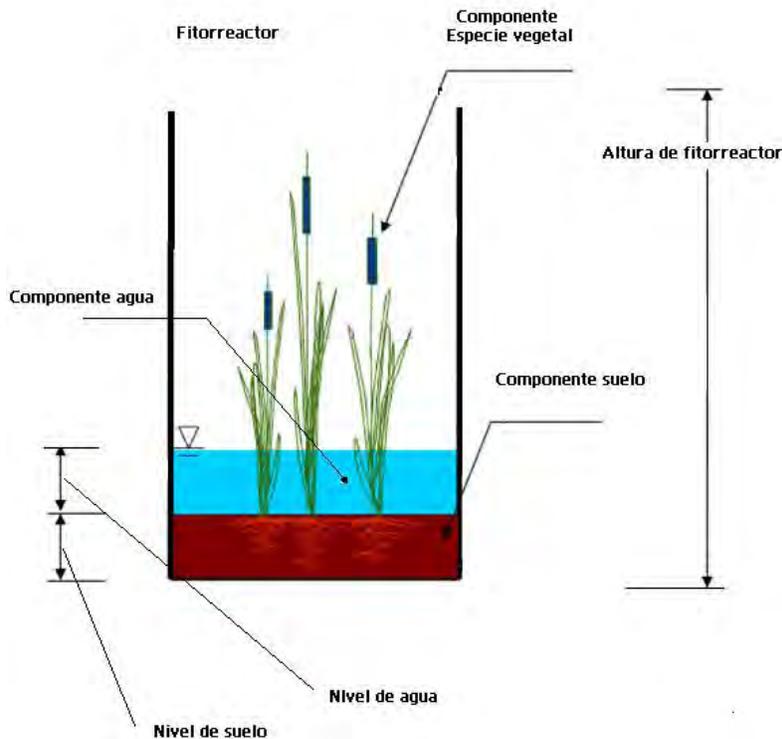


Figura 5. Esquema de fitorreactor con sus componentes

3.7 COMPONENTES DE FITORREACTOR

3.7.1 AGUA

El agua es la fase móvil dentro del fitorreactor del transporte de los contaminantes y en la cual se van a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración. Las condiciones hidrológicas son extremadamente importantes para el mantenimiento estructural y funcional del fitorreactor. Éstas afectan a muchos factores abióticos, incluyendo el estado oxidativo del lecho, la disponibilidad de los nutrientes y la salinidad. Estos factores abióticos, a su vez, determinan qué seres vivos van a desarrollarse en el humedal. Finalmente, y para completar el ciclo, los componentes bióticos actúan alterando la hidrología y otras características fisicoquímicas del humedal.

3.7.2 ESPECIE VEGETAL

El mayor beneficio de las especies vegetales es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración al suelo o medio de soporte y transporta el oxígeno más profundamente de lo que llegaría naturalmente a través una difusión. Lo importante en los Fitorreactores es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan convirtiéndose en lo que se ha llamado restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija responsable de gran parte del tratamiento que se lleva a cabo en el sistema.

En la Figura 6, se muestra un ejemplo de plantas emergentes que contribuyen al tratamiento del agua residual y escurriente de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato, limitan la canalización del flujo.
- Toman nutrientes como el carbono, incorporándolos a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- La aportación de oxígeno que la planta realiza, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

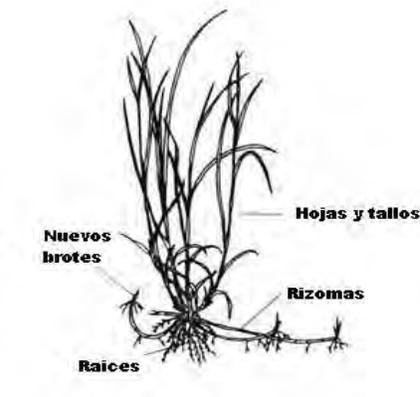


Figura 6. Esquema de componente vegetal emergente

En la Figura 7, se observa a las especies vegetales emergentes que se emplean en la remoción de contaminantes en fitorreactores y humedales artificiales como: carrizos, juncos y los llamados juncos de laguna.

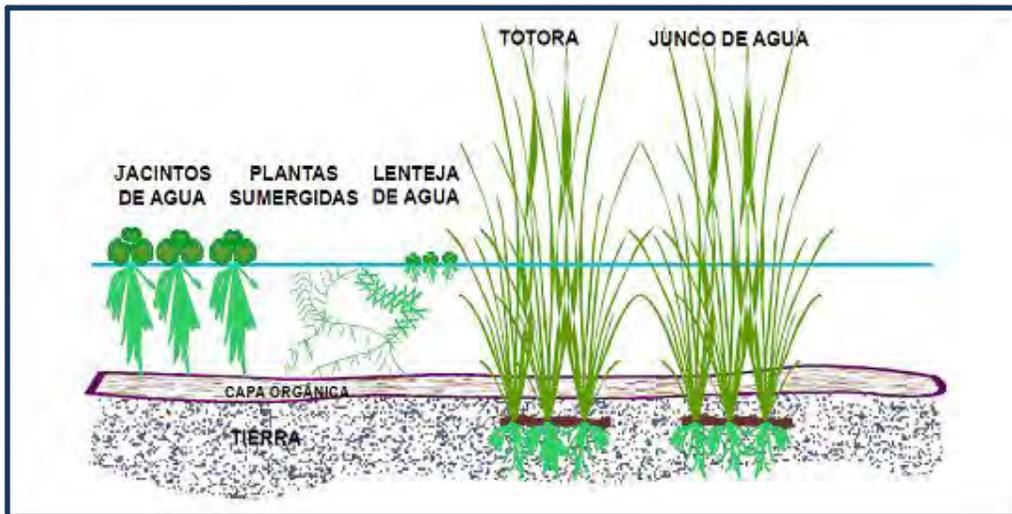


Figura 7. Especies vegetales en un Humedal Artificial

Fuente: Tchobanoglous y Schorodoeder, 1985.

3.7.3 SUELO O SOPORTE

El relleno, los sedimentos y los restos de vegetación, son importante por varias razones:

- Actúan como barrera primaria de tamizado, también actúan como estructura, soporte de las plantas, para el crecimiento y desarrollo de la masa microbiana. En esta función, el tamaño de partícula es importante, puesto que, cuanto más pequeño es el tamaño de partícula, mayor cantidad de biopelícula albergará, pero habrá mayores probabilidades de que se produzcan una obturación de los poros e inundaciones por encima del nivel subsuperficial, por lo tanto, es necesario optimizar el tamaño de partícula.

- Facilitan los mecanismos de adsorción e intercambio iónico entre el agua residual y los componentes minerales del suelo. Por ejemplo, el ión amonio sufre una adsorción débil por parte del lecho, y la cantidad adsorbida depende en gran medida de las condiciones de pH, concentración, etc., en el seno del líquido (Kadlec y Knight, 1996).

- Favorecen la precipitación química de contaminantes disueltos, por ejemplo, precipitación de fosfatos con calcio, aluminio o hierro contenido en el relleno (Molle *et al.*, 2003).

El comportamiento del humedal depende también de si el relleno está saturado de agua o está insaturado. En un relleno saturado, el agua reemplaza el aire atmosférico, hecho que afecta sobre todo a la disponibilidad de oxígeno, y determina la predominancia de mecanismos aerobios o anaerobios en los procesos biológicos que tienen lugar en el humedal. Cuando los aceptores de electrones alternativos al *oxígeno* (nitrato, hierro, manganeso, etc.) son insuficientes como para degradar la materia orgánica existente, aparecen zonas anaerobias en las que se dan procesos de fermentación. Por lo tanto, en un mismo sistema se estarán dando procesos aerobios, anóxicos y anaerobios. La distribución de estas zonas dependerá de las características del agua influente, del aporte de oxígeno, de la morfología de las plantas (profundidad de las raíces, tipo de tallos, etc.), de las condiciones atmosféricas (viento, temperatura), etc.

3.8 HUMEDALES ARTIFICIALES

El entendimiento del proceso de fitorremediación permite incidir en la optimización funcional de humedales artificiales que depuren aguas contaminadas con plaguicidas como el lindano.

La selección de los componentes de los humedales artificial son de suma importancia ya que inciden directamente en el porcentaje de remoción del contaminante contenido en el fitorreactor, por ello, es importe realizar un análisis profundo de cada componente como el componente vegetal, suelos ó soporte, agua y especie vegetal.

3.8.1 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS

Un *humedal artificial* es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, no más de 0.60 m, en el que se siembran plantas acuáticas para tratar el agua residual. Los humedales artificiales tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para funcionar. Si hay suficientes extensiones de tierra disponible cerca de la instalación de los humedales artificiales, puede ser una alternativa de bajo costo efectivo.

3.8.2 SISTEMAS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL “FSS”

El *humedal artificial de flujo subsuperficial* consiste igualmente en una balsa o canal impermeabilizado del exterior, que se encuentra relleno de un material sólido poroso ocupando casi toda su profundidad. El agua residual circula a través del medio poroso y siempre por debajo de la superficie del mismo. Como medio poroso, se suele utilizar rocas o grava. Además de tener medio soporte, estos sistemas funcionan con vegetación emergente, cuyo papel es fundamental para su buen funcionamiento.

La circulación del agua a través del suelo o material de soporte, parece ser siempre más efectiva que la circulación de superficie para muchos de los

mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales. Durante el paso del agua residual, a través del lecho poroso, se produce un contacto con zonas aerobias, anóxicas y anaerobias. La zona aerobia se encuentra en las zonas muy cercanas a la superficie y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas.

Los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran formando una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema. Este hecho hace que el área requerida sea menor que en los humedales de flujo superficial pero con un mayor coste debido al uso de una mayor cantidad de medio poroso. Además, con este sistema, se evitan problemas como posibles plagas de insectos, olores, en climas fríos, y aportan una mayor protección térmica.

Dentro de los humedales de flujo subsuperficial, como se enumeró anteriormente, se puede encontrar dos tipos de flujo: *horizontal* "FSSH" y *vertical* "FSSV". Los primeros trabajan con una alimentación continua realizada a lo largo de uno de los laterales. La recogida del agua depurada se realiza en la parte inferior del lado opuesto al de la alimentación. Como se ve en la Figura 8, el nivel de agua es regulado con una tubería flexible manteniendo en todo momento el lecho saturado de agua.

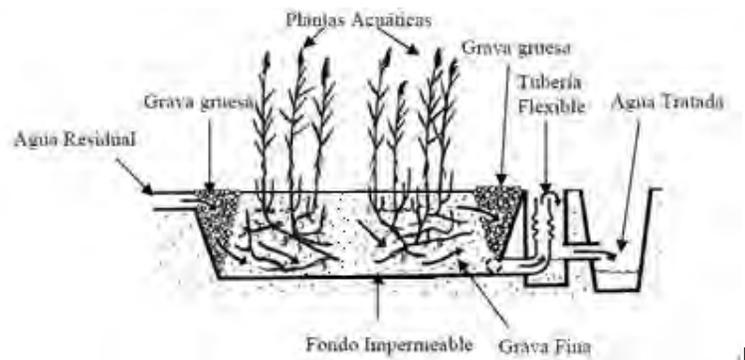


Figura 8. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal

En los de flujo vertical, como se observa en la Figura 9, la alimentación se realiza distribuida uniformemente y habitualmente por cargas por toda la superficie, y la recogida a lo largo de todo el fondo. La tubería flexible, o no existe, o está en la posición más baja para mantener unas condiciones insaturadas en el medio poroso. Con este sistema, se consigue un mayor contacto entre el agua residual y el aire dentro de los poros, por lo tanto, mejores rendimientos en aquellos mecanismos aerobios que tuvieron lugar debido a un mayor aporte de oxígeno. Los inconvenientes son que su operación es más compleja, un poco más cara y que no han sido tan estudiados como los horizontales.

Los humedales artificiales con flujo subsuperficial son muy eficientes en lo referido a costo, consumo energético y mantenimiento, si los comparamos con sistemas convencionales. Desde el punto de vista de los costes, que un sistema “FSS” sea competitivo frente a uno “FS”, para pequeñas comunidades y caudales es difícil, pero esto siempre dependerá de los costos de la tierra, del tipo de impermeabilización que se requiera, el tipo y disponibilidad del material granular empleado.

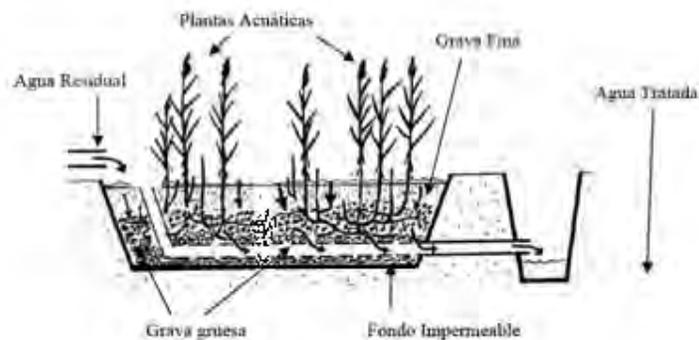


Figura 9. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial

3.8.3 SISTEMA DE FLUJO LIBRE SUPERFICIAL “HAFLS”

Estos sistemas se componen típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la infiltración, suelo u otro medio conveniente, a fin de soportar la vegetación emergente y agua en una

profundidad relativamente baja (0.1 a 0.6 m) que atraviesa el sistema. La baja profundidad del agua, la baja velocidad del flujo y la presencia de las especies vegetales regulan el flujo del agua. El tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente las raíces y la vegetación emergente, Figura 10 (Llagas-Chafloque y Gómez, 2006).

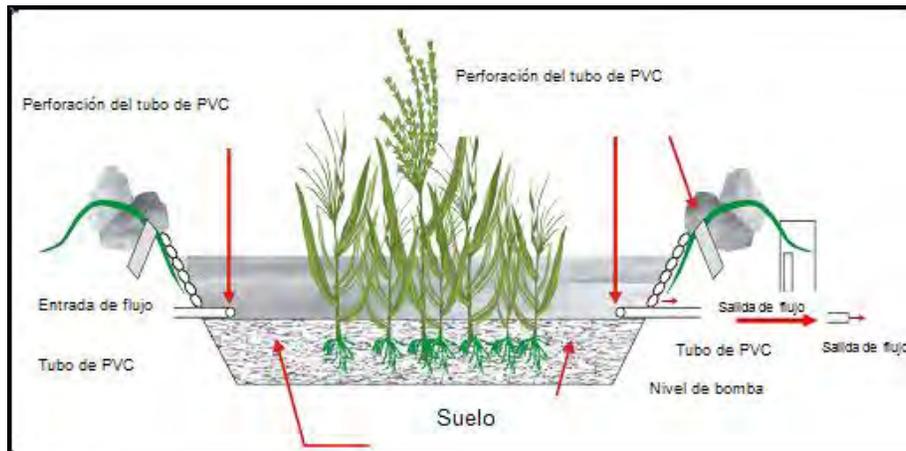


Figura 10. Sistema de flujo libre superficial

3.8.4 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES FLUJO LIBRE SUPERFICIAL

(Ventajas y desventajas)

A continuación se muestra algunas de las ventajas y desventajas de los humedales “HAFLS”.

VENTAJAS

- Los humedales “HAFLS” proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.
- Los humedales “HAFLS” pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.
- La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.

- La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.
- Los sistemas de humedales “HAFLS” no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas, puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.
- La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.
- Métodos alternos de nitrificación en combinación con los humedales “HAFLS” han sido utilizados con éxito.

DESVENTAJAS

- Las necesidades de terreno de los humedales “HAFLS” pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo.
- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales son procesos biológicos y son esencialmente continuos y renovables. El Fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y, por ello, se acumulan con el tiempo.
- En climas fríos, las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación. Un aumento en el tiempo de retención puede ser compensado por la reducción en esas tasas, pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.
- La mayoría del agua contenida en los humedales artificiales “HAFLS” es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco. El aumento del tamaño del humedal y, consecuentemente el tiempo de retención, puede hacerse en forma compensatoria, pero puede no ser eficiente en términos económicos.

- Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
- La población de aves en un humedal “HAFLS” puede tener efectos adversos si un aeropuerto se encuentra localizado en la vecindad.
- Los humedales artificiales “HAFLS” pueden remover coliformes fecales del agua residual municipal, al menos en un orden de magnitud. Esto no siempre es suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La situación puede complicarse aún más debido a que las aves y otras especies de vida silvestre producen coliformes fecales.

3.8.5 FITORREACTORES Y HUMEDALES ARTIFICIALES (SIMILITUDES)

Los *fitorreactores*, al igual que los *humedales artificiales*, han sido diseñados como sistemas de tratamiento de aguas que abarcan una variedad de procesos de tratamiento incluyendo biológicos, químicos, fisicoquímicos, similares a los procesos que ocurren en el tratamiento de aguas residuales en humedales naturales (Healy y Cawley, 2002; Healy y Cawley, 2005), con la diferencia de que en los fitorreactores no hay un flujo de agua (influyente-efluente) y en los humedales artificiales, si existe un flujo de agua siendo ésta la fase móvil dentro del humedal, encargada del transporte de los contaminantes y en la cual se van a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración.

Inicialmente fueron diseñados y usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, los esfuerzos de investigación y operación llevados a cabo por más de cincuenta años, han permitido que los humedales artificiales ahora sean usados con éxito para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales incluyendo efluentes industriales, urbanos, lluvias, aguas provenientes de la actividad agrícola, lixiviados y lodos de minas (Lee *et al.*, 2005).

3.9 PROCESOS DE REMOCIÓN

3.9.1 PROCESOS FÍSICOS

Los humedales artificiales son capaces de proporcionar un alto porcentaje en la remoción de contaminantes asociados con material particulado. El agua superficial se mueve lentamente a través del humedal artificial, debido al característico flujo laminar y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. Las esteras de plantas en los humedales artificiales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su papel primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados al fondo del humedal artificial.

La resuspensión del sedimento puede resultar en la exportación de sólidos suspendidos y reducir el porcentaje de remoción, lo cual podría ocurrir principalmente durante los periodos de alta velocidad de flujo en el humedal. Esto es el resultado de la turbulencia de la dirección del viento, bioturbación (perturbación por animales y seres humanos). Los gases que se desprenden del humedal son el *oxígeno*, formado a partir de la fotosíntesis del agua, *metano* y *dióxido de carbono*, los cuales son producidos por los microorganismos presentes en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica (Benefield y Randall, 1980; Llagas-Chafloque y Gómez, 2006).

3.9.2 PROCESOS BIOLÓGICOS

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la eliminación de contaminantes en los humedales artificiales. Los contaminantes pueden ser en ocasiones formas asimilables de nutrientes para las plantas del humedal tales como nitratos, amonio y fosfatos, los que pueden ser asimilados fácilmente. Sin embargo, muchas especies de plantas son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales pesados como Cadmio y Plomo.

La velocidad de remoción del contaminante por las plantas varía extensamente, ya que puede depender de la velocidad de crecimiento de éstas, así como de la concentración del contaminante que es capaz de translocar a su tejido. Las plantas leñosas, es decir, árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento a largo plazo de contaminantes comparado con las plantas herbáceas. Sin embargo, la velocidad de captación del contaminante por unidad de área de tierra, es a menudo mucho más alta para las especies vegetales herbáceas. Las bacterias y otros microorganismos en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo.

En los humedales, el material de la especie vegetal muerta, conocido como *detritus o basura*, se acumula en la superficie del suelo. Algunos de los nutrientes y contaminantes eliminados previamente del agua por la planta, son reciclados nuevamente al agua y al suelo. La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente cuando la planta muere, una pérdida gradual de contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros microorganismos (Llagas-Chafloque y Gómez, 2006).

3.9.3 PROCESO QUÍMICOS

El proceso químico más importante de la remoción de contaminantes en los humedales artificiales es la *absorción*, que da lugar a la retención a corto plazo o inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes. La *absorción* es un término utilizado para explicar la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución acuosa a la fase sólida (suelo). La *absorción* describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La *absorción* se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química.

El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de arcilla o materia

orgánica presente en el suelo. Esta es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo. Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, incluyendo el amonio (NH_4^+) y la mayoría de metales trazas tales como el cobre (Cu^{+2}).

Por otro lado, la volatilización implica la difusión de un compuesto disuelto en el agua hasta la atmósfera. Es otro mecanismo potencial de la remoción de contaminantes en los humedales artificiales. La volatilización del amoníaco (NH_3) puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno si el pH del agua es alto (mayor de 8.5 unidades). Sin embargo, a pH bajos el nitrógeno del amoníaco existe casi exclusivamente en forma ionizada (amonio, NH_4^+), el cual no es volátil.

Muchos tipos de compuestos orgánicos volátiles se pierden fácilmente en la atmósfera desde los humedales naturales y de otras aguas superficiales. Aunque la volatilización puede remover con eficacia ciertos contaminantes del agua, puede demostrar también ser indeseable en algunos casos, debido al potencial para contaminar. (Llagas-Chafloque y Gómez, 2006; Benefield y Randall, 1980).

Resumiendo, los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales traza, sustancia orgánica y patógena. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo.

Los mecanismos básicos de tratamiento en un humedal artificial incluyen sedimentación, precipitación química, absorción, e interacción biológica, así como la translocación de los contaminantes por parte de la vegetación del humedal.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio para la cual se conduce la investigación, es la Cuenca del Río Papaloapan, línea divisoria de las aguas más importantes de México con un área de 51.025.52 km² en tres Estados (Oaxaca, Puebla y Veracruz). Esta área cuenta con suelo fértil y un clima húmedo caliente, factores favorables para el desarrollo de la agricultura, ganado, industrias pesqueras y una industria de azúcar (caña de azúcar). La Cuenca del Río de Papaloapan es la segunda en términos de su volumen en México. Es un río que desemboca en el Golfo de México, principalmente de las ciudades de Tuxtepec (Oaxaca), de Alvarado, de Tlacotalpan y de Cosamaloapan (Veracruz).

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL FITORREACTOR EXPERIMENTAL

Cada uno de los componentes que conformaron el fitorreactor experimental fueron: El *soporte* (suelo), *componente vegetal* (especie seleccionada), y *agua desionizada*.

4.2.1 SUELO

Método (Ver anexo 3)

Para la caracterización de las muestras de suelo se hicieron las siguientes determinaciones:

- **PH.** Método potenciométrico.
- **Textura.** Método del hidrómetro.
- **Materia orgánica.** Método de oxidación de Dicromato.
- **Humedad.** Método de conductividad hidráulica.

4.2.2 AGUA DESIONIZADA

Las características del agua utilizada son: agua desionizada la cual se le han quitado los *cationes*, como los de sodio, calcio, hierro, cobre y otros, y *aniones* como el carbonato, fluoruro, cloruro, etc., mediante un proceso de intercambio iónico. Esto significa que al agua se le han quitado todos los iones excepto el H^+ , o más rigurosamente H_3O^+ y el OH^- , pero puede contener pequeñas cantidades de impurezas no iónicas como compuestos orgánicos.

4.2.3 COMPONENTE VEGETAL:

Typha dominguensis

Es una planta monocotiledónea acuática, herbácea, enraizada a poca profundidad (0.5 a 2 m) en corriente lenta o estacionaria, emergente, perenne; de hasta 2 m de altura, se extiende rápidamente y llega a ser dominante, excluyendo a la mayoría de las otras especies nativas que forman el humedal, formando los tulares o tifales. Se encuentra en áreas reposadas de agua dulce de lagos, lagunas, pantanos, zanjas y canales. Puede comportarse como especie invasora maleza. Su sistema radicular es un rizoma con cortes altamente porosos y numerosas raíces adventicias de mediana longitud. Se reproduce asexualmente por medio de extensión del rizoma en terrenos inundados o saturados.

Se conoce en Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán (EPA, 2000).



Figura 11. Typha dominguensis

Sagittaria lancifolia

Monocotiledónea herbácea, perenne nativa de humedales donde el manto freático tiene poca profundidad (0.1-3m) y el hidroperíodo es largo. Es integrante del tipo de vegetación llamado “popal”, crece junto con otras especies de macrófitas emergentes. Su sistema radicular es un rizoma grueso con raíces adventicias largas, se extiende horizontalmente generando nuevos organismos por reproducción asexual (EPA, 2000).



Figura 12. Sagittaria lancifolia

Echinochloa pyramidalys

Especie de monocotiledónea africana, introducida como forraje en terrenos inundables, que en humedales ha encontrado un ambiente propicio para establecerse y crecer abundantemente. Forma comunidades monotípicas excluyendo a la mayoría de las especies nativas. Su sistema radicular es un rizoma de gran extensión y numerosas raíces adventicias; se reproduce de manera asexual (EPA, 2000).



Figura 13. Echinocloa pyramidalys

El mayor beneficio de las especies vegetales es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. La presencia en el sistema de los tallos, raíces y rizomas, permite la penetración al oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la difusión. Lo más importante en los fitorreactores es que las porciones sumergidas de hojas y tallos se degradan convirtiéndose en lo que es llamado *restos de vegetación*, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija responsable de gran parte del tratamiento. Es muy importante señalar que se seleccionaron especies de 0.25 m de altura aproximadamente de la zona de estudio, Río Papaloapan, Veracruz.

Se buscó que las plantas presentarán las siguientes características:

- Ser monocotiledóneas herbáceas de amplia distribución en humedales naturales.
- La velocidad de remoción de contaminante.
- Rápida tasa de crecimiento de las especies vegetales y alta productividad.
- Rapidez de acumulación del contaminante en tejido de la especie vegetal.
- Ser tolerante a altas concentraciones de plaguicidas.
- Ser especies locales representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables.
- Ser acumuladoras de plaguicidas.
- En este proyecto se utilizaron diferentes especies vegetales para observar el comportamiento depurativo.

Diferentes variedades de especies vegetales han sido seleccionadas para el uso en los diferentes tipos de humedales artificiales como se observa en la Tabla 13.

Tablas 13. Plantas de uso frecuente en Humedales Artificiales

Género-Especie (nombre común)	Temperatura deseable °C	Tolerancia máx. por salinidad mg/L)	pH óptimo	Penetración de la raíz (m)
<i>Typha dominguensis</i>	10-30	30000	4-10	0.3-0.4
<i>Sagittaria lancifolia</i>	11-35	45000	2-8	0.6
<i>Echinocloa pyramidalys</i>	15-28	20000	4-9	0.2-0.3

Fuente: Martínez, 1979.

4.2.4 LINDANO

Se utilizo el lindano de grado reactivo (Aldrich Chemical) con 97% de pureza.



Figura 14. Reactivo lindano

4.3 DISEÑO DEL FITORREACTOR EXPERIMENTAL

Los fitorreactores fueron fabricados en material plástico para aumentar su resistencia en el manejo y operación. Sus dimensiones fueron de 30 cm. de diámetro x 40 cm. de altura, con un sistema abierto para mantener temperatura ambiente. Los componentes que lo conformaron fueron: el soporte (suelo), componente vegetal y agua desionizada. En la Figura 15 se observa el fitorreactor de forma dimensional.

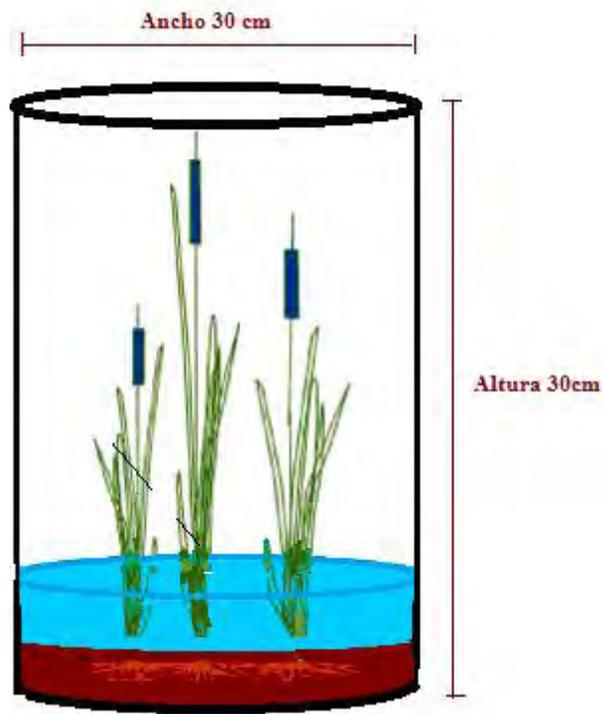


Figura 15. Características del fitorreactor experimental

El fitorreactor es la etapa de mayor importancia dentro del tren de tratamiento (fitorremediación) ya que en él, se colocaron diferentes tipos de especies vegetales que complementaron el proceso de depuración de suelos y agua residual.

4.3.1 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL FITORREACTOR

Una vez culminadas las etapas preliminares de selección y aclimatación de especies vegetales y acondicionamiento de materiales, entre otras, se prosiguió con la instalación y funcionamiento de los equipos empleados en el proceso con pruebas previas al arranque del sistema experimental. En la Figura 16 se observa un diseño teórico del fitorreactor en el cual se observan sus componentes.

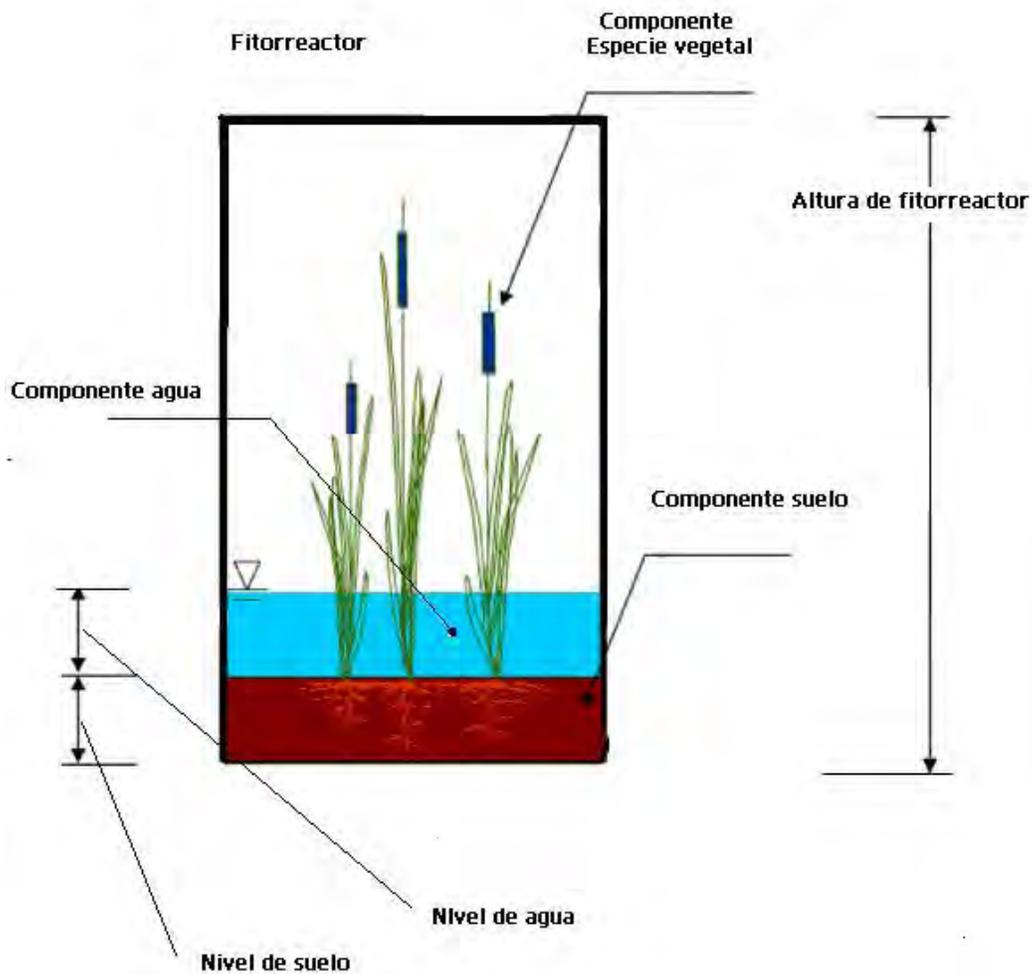


Figura 16. Diseño del fitorreactor

4.3.2 COLOCACIÓN DE LINDANO EN EL FITORREACTOR

El primer paso fue diluir el lindano en agua (7 mg/L de agua) hasta quedar totalmente homogéneo para posteriormente agregarlo en el fitorreactor.

Una sola concentración.

4.3.3 COLOCACIÓN DE ESPECIES VEGETALES EN EL FITORREACTOR

Se colocaron tres especies diferentes de plantas: *Typha dominguensis*, *Echinochloa pyramidalys* y *Sagittaria lancifolia*.

La mecánica de colocación de la especie vegetal, se llevó a cabo de forma manual de acuerdo a los siguientes pasos:

- Selección de especies de 0.25 m de altura aproximadamente.



Figura 17. Selección y aclimatación del componente vegetal

Nota: Ver anexo 1

- Formación de cavidad en el sustrato de profundidad suficiente.
- Introducción en el rizoma, en la cavidad del sustrato a una profundidad suficiente para permitir la viabilidad de los organismos.
- Una especie por fitorreactor.
- Una planta por fitorreactor.



Figura 18. Instalación del fitorreactor en LMBE, Facultad de Química UNAM

4.4 PRUEBAS EN EQUIPO EXPERIMENTAL INSTALADO

Para la prueba de evaluación se realizó un balance teórico global de suelo-agua durante el tiempo de operación del sistema, razones por las cuales es importante verificar fugas en el sistema en cualquiera de las partes que lo conforman. Así también, fue importante hacer las estimaciones de la evapotranspiración del medio y las plantas en conjunto. Es importante mencionar que los valores de las pérdidas por la evapotranspiración y aportes de agua por precipitación, en este sistema en particular son mínimos, sin embargo, es de suma importancia tomar en cuenta estos valores en sistemas donde la superficie en los sistemas son de mayor tamaño.

4.4.1 ETAPA DE ARRANQUE DEL FITORREACTOR EXPERIMENTAL

En esta etapa se llevaron a cabo actividades relacionadas con la operación en el sistema general. Durante este tiempo, se observaron las posibles fallas y se realizaron las adecuaciones pertinentes para mejorar el sistema. Con ello, fue posible establecer programas de mantenimiento para el sistema, promoviendo que se elevara el porcentaje de remoción y su estabilidad depurativa.

La etapa de pruebas preliminares se llevó a cabo durante un periodo de aproximadamente dos meses. Durante este tiempo, se efectuaron pruebas de hermeticidad y fue posible aclimatar las especies vegetales seleccionadas para el experimento.

4.4.2 PRUEBAS OPERATIVAS

En esta sección, se describen los puntos más importantes que representan las etapas operativas del sistema experimental. Dentro de las pruebas e inspecciones que se realizaron en el sistema se encuentran:

- Contaminación externa
- Colocación de especies vegetales
- Apariencia de las especies vegetales
- Niveles de agua
- Fugas en el sistema experimental

Para todos los casos, se plantearon estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo para el mejoramiento del sistema.

4.4.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

Durante la etapa de arranque es importante llevar a cabo la evaluación de los equipos. Pero más aún, es importante llevar un registro en parámetros

fisicoquímicos y biológicos, los cuales reflejan la depuración y transformación de los suelos y aguas contaminadas en los sistemas de tratamiento.

4.4.4 PRUEBA DE ADSORCIÓN - DESORCIÓN DEL LINDANO EN SUELO

El suelo agrícola fue recolectado a las orillas del Río Papaloapan. El suelo recogido fue caracterizado para determinar: pH, contenido de la materia orgánica, textura, conductividad hidráulica.

4.4.5 ISOTERMA DE ADSORCIÓN

Para determinar la adsorción del lindano en soluciones del suelo, fueron preparados las concentraciones del lindano a 0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 y 7.0 mg/L (Prakash *et al*, 2004; Poggi-Varaldo *et al*, 2002; Poggi-Varaldo y Rinderknecht-Seijas, 2003; Robles-González *et al*, 2006), los cuales además contenían CaCl₂ a una concentración (0.01M) para minimizar el intercambio catiónico y 300 mg/L de azida de sodio para esterilizar el medio químicamente. En botellas de vidrio se colocaron 25 mL de solución contaminante y 5 g de suelo estéril por duplicado.

Los controles consistieron en colocar 25 ml de solución de lindano a cada concentración en las botellas de vidrio, las cuales no contienen suelo. Las unidades experimentales y controles se incubaron a 25°C, 120 rpm, en la oscuridad por 4 días (Fall *et al.*, 2000; Grawlik *et al.*, 2003). Al finalizar el periodo de contacto, se decantó y centrifugó (7000rpm, 30 min.) el sobrenadante de cada unidad experimental y control.

Se cuantificó la cantidad de lindano en el sobrenadante por cromatografía de gases. Una vez obtenidos las concentraciones de lindano en el sobrenadante, se realizaron los cálculos pertinentes de balance de masa para obtener la isoterma de adsorción del contaminante en el suelo (Poggy-Varaldo, *et al.*, 2002).

4.4.6 ISOTERMA DE DESORCIÓN

Se usó el suelo del ensayo de adsorción de la unidad experimental con 7mg/L de lindano, dado que la máxima solubilidad de lindano en agua es de 7.3 mg/L a 20°C (ver Tabla 6. Propiedades Físicoquímicas). Se lavó una vez el suelo con 10 mL de agua destilada y se eliminó el agua remanente centrifugando el suelo (7000rpm, 15 min.). Posteriormente se agregó 25 mL de agua destilada con CaCl₂, 0.01M y 300 mg/L de azida de sodio al suelo anteriormente tratado.

Se incubó a 25°C, 120 rpm, en la oscuridad por 4 días. Al finalizar el periodo de contacto, se decantó y centrifugó (7000rpm, 30 min.). Se cuantificó la cantidad de lindano en el sobre nadante por cromatografía de gases.

El procedimiento anterior se repitió 5 veces con las muestras de suelo correspondientes, hasta que el lindano fuera del orden del límite de detección. Una vez obtenidas las concentraciones del lindano desorbido en el sobrenadante, se realizaron los cálculos pertinentes por balance de masa para obtener las isothermas de desorción del contaminante en el suelo (Poggy-Varaldo, *et al.*, 2002).

4.5 DESARROLLO DEL MODELO

El comportamiento adsorptivo-desorptivo de un contaminante en una matriz sólida está caracterizado por la isoterma de adsorción lineal $q_a = k_1 \cdot C$ donde q_a : concentración del adsorbato en la fase sólida al equilibrio, en mg·kg⁻¹, C : concentración del adsorbato en la solución, en mg·l⁻¹, y k_1 : coeficiente de adsorción lineal, en l·kg⁻¹ y por la isoterma de desorción de Langmuir $q_d = (a \cdot b \cdot C) / (1 + b \cdot C)$ donde q_d : coeficiente de desorción, concentración del adsorbato en la fase sólida al equilibrio, en mg·kg⁻¹, a : coeficiente de desorción máxima, en mg·kg⁻¹, y b : coeficiente relacionado a la razón de crecimiento en la curva, en l·mg⁻¹, entonces el coeficiente diferencial de histéresis de Poggy en un punto de interés (C_j, q_j) de la isoterma estará dado por interés, y m_d : valor numérico de la pendiente de la isoterma de desorción en el punto de interés.

$$CH|_{C=C_j} = (dq_a/dC) / (dq_d/dC) = m_a/m_d = (a \cdot b) / k_1 \quad (1)$$

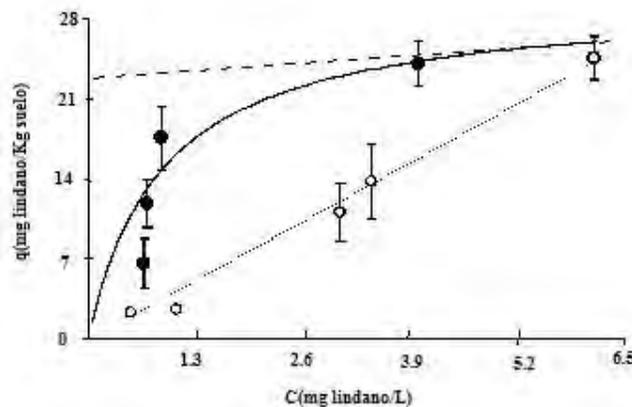


Figura 19. Isoterma de adsorción-desorción

Isoterma de desorción Langmuir

○ Isoterma de adsorción experimental

● Isoterma de desorción experimental

...Isoterma de adsorción lineal

4.6 PRUEBA DE BIOACUMULACIÓN A ESPECIE VEGETAL

Las tres especies de plantas herbáceas seleccionadas para probar la bioacumulación del lindano eran nativas a los humedales naturales en el área de estudio. La *Typha domingensis*, *Echinochloa pyramidalys* y la *Sagittaria lancifolia* fueron recolectadas de la región del Río Papaloapan, en el Estado de Veracruz. Las tres especies son monocotiledóneas, y tienen la capacidad de reproducirse asexualmente por la extensión del rizoma y la generación de nuevos brotes, además de ser comunes en humedales de agua dulce.

Los trasplantes fueron aclimatados a las condiciones del invernadero (18-34 °C) por lo menos un mes, régimen semicontínuo de la humedad (sistema modelo de humedal, inundado), para los ensayos de bioacumulación y tolerancia de la especie vegetal al lindano. Las especies vegetales estuvieron en contacto con el lindano a través de suelo contaminado en una concentración de 7 mg lindano/kg de agua (Tanabe, 2004). El suelo contaminado fue colocado en reactores (5 kilogramos), y después se trasplantó la especie vegetal (menos de 25 cm cada planta) y finalmente se inundó el piso del

reactor con agua (3 cm). El tiempo de exposición fue de 18 días. Para el análisis de bioacumulación de lindano, la especie vegetal fue recolectada cada tercer día, separando la raíz, el vástago y la hoja para el análisis y extracción.

4.7 EXTRACCIÓN VEGETALES

La extracción de lindano en planta (raíz, tallo y hoja) se realizó de acuerdo al método descrito por (Waliszewski et al., 1985), modificado para horno de microondas.

La muestra vegetal (200g) fueron depositadas en bolsas de plástico marca Ziploc y congeladas a 40°C en un ultra congelador. Las muestras congeladas se deshidrataron en un liofilizador marca Thermo Savant Moduly OD-114 durante 48 horas a 49°C y 36×10^{-3} mbar. La muestra seca se molió y se colocó nuevamente en la bolsa Ziploc para su almacenamiento en un desecador. La extracción se realizó con 10 g de muestra seca, se depositó en un vaso de teflón del horno de microondas y se agregó 20 mL de acetona y 20 mL de hexano. El vaso de teflón con sus respectivas réplicas se colocó al horno de microondas marca “CEM modelo MARS, USA.”, durante 10 min.

A la muestra contenida en el vaso de teflón se le adicionó 20 mL de hexano y 20 mL de acetona más, posteriormente, mediante un embudo de cristal y papel filtro del No.4 (Whatman), se filtró la muestra a un matraz de 250 mL para separar el extracto de los sólidos. A los extractos se le agregaron 50 mL de solución acuosa de Sulfato de sodio al 5 % y se mezcló el contenido. El plaguicida se extrajo con tres porciones de 30 mL de hexano. Los extractos hexánicos se filtraron en un matraz bola de fondo plano de 250 mL, pasándolos por una capa de 5 cm de altura de sulfato de sodio (10 g de sulfato de sodio activado a 660°C por 48 horas); posteriormente se concentró en un rota evaporador a 5 mL.

El extracto concentrado se traspasó cuantitativamente con Hexano a un tubo con tapón ajustado el volumen a 10 mL. Se purificó el extracto agregando 1 mL de ácido sulfúrico concentrado agitándose vigorosamente durante 1 minuto. Se dejó reposar por 3 minutos para separar las fases, y se filtró la fase orgánica

nuevamente por una capa de sulfato de sodio. Se enjuagó el sulfato de sodio con 50 mL de hexano (dos veces) y los enjuagues se colectaron en un matraz balón, para concentrar nuevamente a 1mL. El extracto se transfirió a un vial volumétrico aforado a un volumen final de 1.5 mL con hexano. En la purificación de los extractos de raíz, tallo y hoja, se utilizó ácido sulfúrico, cuya ventaja consistió en precipitar las sustancias orgánicas vegetales e hidrolizar el complejo de plaguicida con los compuestos orgánicos endógenos. Del extracto se cuantificó el plaguicida por cromatografía de gases.

La extracción de lindano en el agua tratada se realizó de acuerdo al método descrito en (Standar Methods, 1989). Se midió en una probeta 100 mL de muestra y se transfirió a un embudo de separación de 250 mL, se agregó 20 mL de hexano (calidad pesticida) y 5 mL de solución saturada de sulfato de sodio. La mezcla en el embudo se agitó vigorosamente durante 3 min., se dejó reposar hasta la separación de fases. Se drenó la fase acuosa a la probeta empleada para medir la muestra, y los extractos de hexano se colectaron en un matraz bola de fondo plano (250 mL). La fase acuosa se transfirió nuevamente al embudo de separación y se adicionó 10 mL de hexano y 5 mL de solución saturada de sulfato de sodio (se agitó la mezcla). Este procedimiento se hizo dos veces y se colectaron los extractos de hexano en el matraz.

La fase orgánica se pasó a través de una columna de 5 cm de altura de sulfato de sodio (10 g de sulfato de sodio activado a 660°C por 48 horas). La fase orgánica se recibió en un matraz bola para posteriormente concentrar en un rota evaporador a 5 mL. El extracto concentrado se purificó agregando 1 mL de ácido sulfúrico concentrado y se agitó vigorosamente durante 1 minuto. Se dejó reposar (3 minutos) para separar las fases y filtrar la fase orgánica por una capa de sulfato de sodio.

Se enjuagó el sulfato de sodio con 50 mL de hexano (dos veces) y el extracto con los enjuagues fueron colectados en un matraz balón, donde se concentró nuevamente a 1mL. El extracto se transfirió a un vial aforado a un volumen final de 1.5 mL con hexano. Del extracto se cuantificó el plaguicida por cromatografía de gases.

Este procedimiento de extracción también se aplicó para la cuantificación de lindano en el filtrado del suelo del ensayo de adsorción-desorción de lindano en suelo.



Figura 20. Liofilizador Thermosavant



Figura 21. Horno de Microondas "Cem Modelo Mars USA"

4.8 CUANTIFICACIÓN DE LINDANO

El análisis de lindano se determinó en un Cromatógrafo de gases "Trace GC Ultra" marca "Thermo Scientific", con detector de captura de electrones (ECD) y una columna capilar "Thermo TR-1701 (30 m X0.32 mm ID X 0.25 μ m, Thermo Scientific), como gas acarreador Nitrógeno (N_2 , 99.99%) a 1.2 mL/min. La temperatura del horno fue programada de 60 °C (1min) a 280 °C a una velocidad de 15 °C/min, 280 °C (1 min). La temperatura del inyector operando en modo splitless (volumen inyectado 1 μ L) fue de 300 °C y la temperatura del detector DCE fue de 350 °C.



Figura 22. Cromatógrafo de gases. "Trace Ultra"

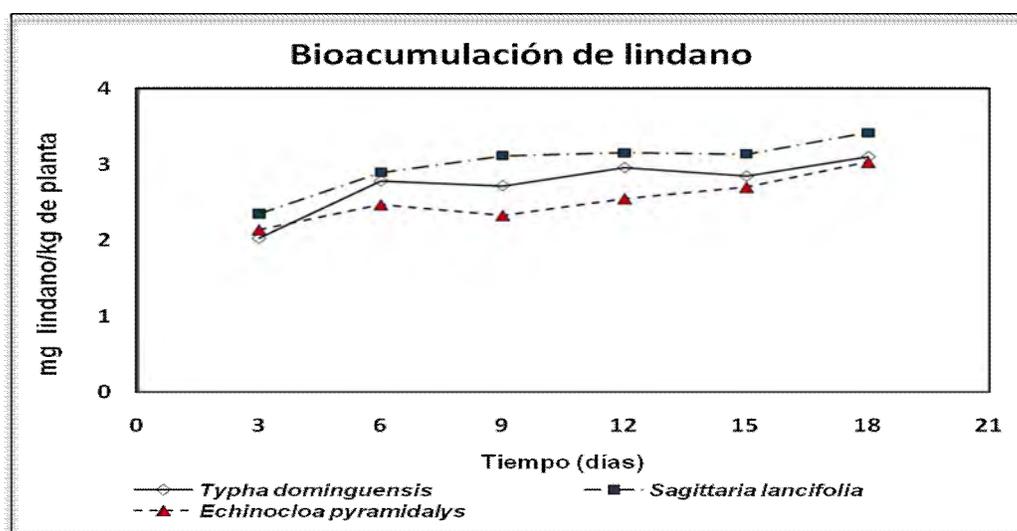


Figura 23. Extracción de muestras para inyección al Cromatógrafo

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Son pocas las investigaciones relacionadas con la remoción de plaguicidas depositados en suelo (Ortega *et al.*, 2010, en prensa). De ahí la importancia de estudiar la respuesta del componente vegetal en la remoción de lindano.

Los resultados de remoción del lindano en las especies vegetales se muestran en la Gráfica 1, mientras que los resultados promedio de bioacumulación en raíz, tallo y hoja, se presentan en la Tabla 14, en la que observamos que la especie vegetal *Sagittaria lancifolia* fue la especie vegetal que presentó la mayor bioacumulación del lindano en el tiempo de operación, en comparación con las otras especies vegetales.



Gráfica 1. Promedio de bioacumulación de lindano en raíz, tallo y hoja

Al realizar el balance másico se determinó que, fue en la raíz, donde se presentó la mayor concentración de lindano detectada en las tres plantas. La concentración bioacumulada en raíz fue de 2.22, 1.99 y 1.59 mg de lindano/kg de la planta (base seca) en *Sagittaria lancifolia*, *Typha dominguensis* y *Echinochloa pyramidalis*, respectivamente. En tallo y hoja fue mayor en *Echinochloa pyramidalis* (0.89 y 0.09 mg lindano/kg de la planta, respectivamente) que en *Typha dominguensis* y *Sagittaria lancifolia*.

Tablas 14. Bioacumulación del lindano en especies vegetales

Especie vegetal / (mg lindano/kg planta)	Raíz	Tallo	Hoja
<i>Typha dominguensis</i>	1.99	0.75	N.A.
<i>Sagittaria lancifolia</i>	2.22	0.74	0.07
<i>Echinochloa pyramidalys</i>	1.59	0.89	0.09

Al tomar en cuenta, como parte fundamental de este trabajo, la obtención de datos experimentales para seleccionar al componente vegetal que mayor remoción de lindano obtuvo en un fitorreactor bajo condiciones de laboratorio, los resultados que se obtuvieron fueron manejados con sumo cuidado.

Para determinar la remoción del fitorreactor fue necesario llevar a cabo un análisis y construcción de gráficas para apoyar la interpretación de los resultados finales.

5.1 RESULTADOS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

El suelo fue colectado de una zona agrícola donde se practica la agricultura, en la zona de Río Papaloapan, Veracruz, y fue sujeto a los siguientes análisis fisicoquímicos:

5.1.1 DETERMINACIÓN DE PH

El pH del suelo fue medido en una mezcla de suelo-agua: desionizada 1:2 (W/W) (Willard *et al.*, 1974; Bates, 1983).

Tablas 15. Determinación de pH

Muestra de suelo	pH
1	7.6
2	7.4
3	7.75
4	7.76
5	7.74
6	7.76
Promedio	7.66
Desviación Estándar	0.01

Los resultados por etapa del tren de tratamiento, mostraron que el pH se mantuvo en un intervalo de 7.4 a 7.7 con un promedio de 7.66 unidades, cercano a la neutralidad.

Ver método en ANEXO 3.

5.1.2 DETERMINACIÓN DE TEXTURA

La textura del suelo fue determinada por el Método del Hidrómetro (Gee y Bauder, 1986).

Tablas 16. Determinación de textura

Lecturas del hidrómetro			Lecturas corregidas						
Muestra de suelo	40 s	2 h	F.C.	40 s	2 h	% de arcilla + limo	% de arena	% de arcilla	% de limo
1	8	3	1.62	9.62	4.62	19.24	80.76	9.24	10
2	8	3	1.62	9.62	4.62	19.24	80.76	9.24	10
3	9	3	1.62	10.62	4.62	21.24	78.76	9.24	12
Promedio							80.09	9.24	10.67
Desviación Estándar							1.15	0.00	1.15

Como se muestra en la tabla 16, el suelo presentó una textura Franco Arenosa.

(2 h) horas. Tiempo en que se espero que se sedimentara el suelo en la probeta.

F.C. es el factor de conversión que se utiliza en la fórmula, el cual depende de la temperatura a la cual se está realizando la determinación. % de arena = $(B/A) \times 100$.

Donde:

A = peso de la muestra

B = peso de arenas

% de arcilla = $(E / A) \times 100$

C = peso de arcilla + limo = $(A - B)$

% de limo = $(F / A) \times 100$

D = peso del suelo en la alícuota (partículas < 0.002 mm)

E = peso de arcilla = $D \times 8$

F = peso del limo = $A - B - E$

Ver método en ANEXO 3.

5.1.3 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN SUELO

La determinación de humedad fue por el Método de Conductividad Hidráulica e Infiltración (Gil R. 1999).

Tablas 17. Determinación de humedad en suelo

Muestra Suelo	PB	Psh	PB+Psh	PB+Pss	θ %
1	0.89	30.00	30.89	26.19	18.57
2	0.87	30.00	30.87	26.14	18.71
3	0.85	30.00	30.85	26.10	18.81
4	0.88	30.00	30.88	26.22	18.38
5	0.82	30.00	30.82	26.08	18.76
6	0.87	30.00	30.87	26.18	18.53
				Promedio	18.63
				Desviación Estándar	0.16

El resultado de la determinación de humedad en suelo es de 18.6 %.

Ver método en ANEXO 3.

$F = \text{peso del limo} = A - B - E.$

5.1.4 DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN SUELO

El contenido de materia orgánica fue estimado por oxidación de dicromato (Nelson y Sommers, 1982).

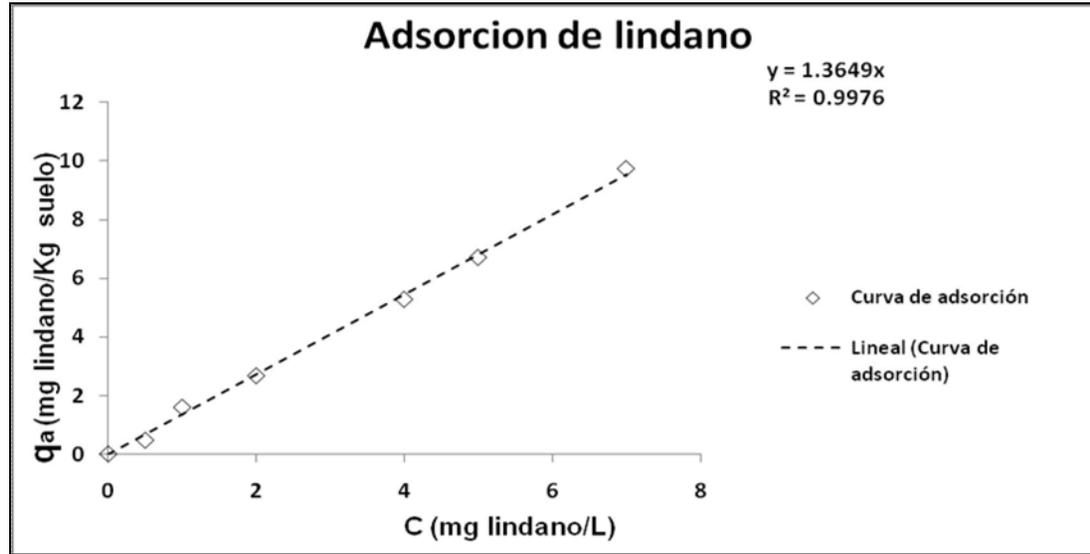
Tablas 18. Determinación de Materia orgánica

Muestra	B	N	T	G	Mcf	% (C) Orgánico	% Materia orgánica
1	8.5	6.3	1.1764	0.47	1.298	2.15	2.79
2	8.5	6.5	1.1764	0.53	1.298	1.73	2.25
3	0	0	1.1764	0.50	1.298	1.93	2.50
						Promedio	2.51
						Desviación estándar	0.27

El resultado de esta determinación es que tiene bajo contenido de materia orgánica 2.51 %

Ver método en ANEXO 3.

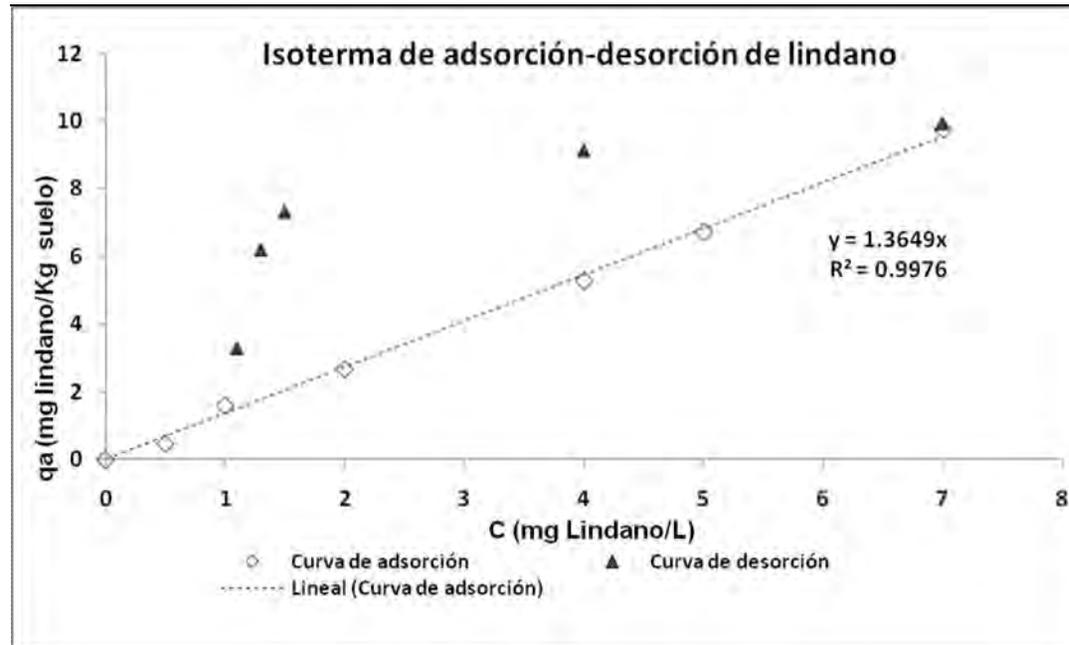
5.2 RESULTADOS DE PARÁMETROS DE ADSORCIÓN Y DESORCIÓN EN SUELOS



Gráfica 2. Adсорción de lindano

Ecuación de la isoterma de adsorción	
$Y = 1.3649X$	$q_a = K_1C$
$q_a = 1.3649 C$	
Donde:	
q_a = Concentración del adsorbato en la fase sólida (mg lindano/kg suelo)	
C = Concentración del adsorbato en la solución (mg lindano/L)	
K_1 = Coeficiente de adsorción lineal (L/kg)	

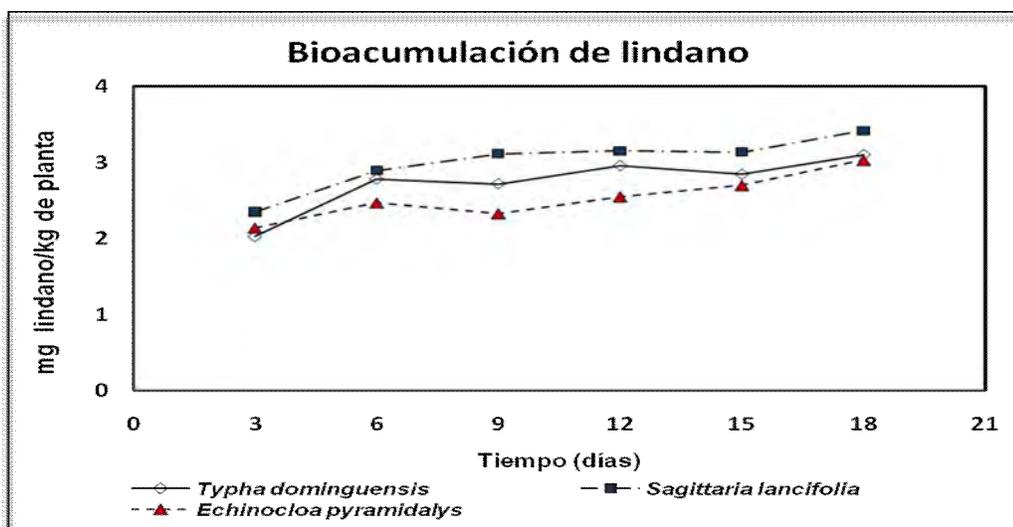
Ver método en ANEXO 2.



Gráfica 3. Adsorción – desorción de lindano

Ver Capítulo 4. Metodología y Anexo 2.

5.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE LINDANO EN ESPECIES VEGETALES



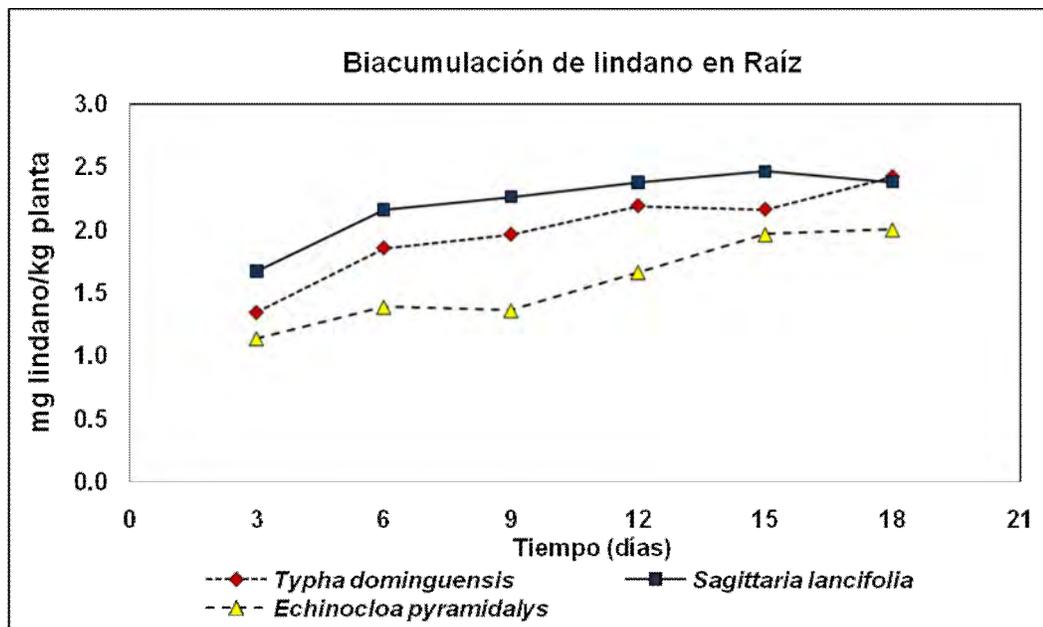
Gráfica 4. Bioacumulación de lindano en 3 especies vegetales.

(mg lindano/kg planta)

Los resultados de bioacumulación del lindano en las plantas se muestran en la Gráfica 4, en la cual *Sagittaria lancifolia* fue la especie vegetal que presentó la mayor bioacumulación del lindano en los 18 días de exposición, seguida de la especie vegetal *Typha dominguensis* y después la *Echinochloa pyramidalys*.

*Nota: la experimentación se realizó por duplicado.

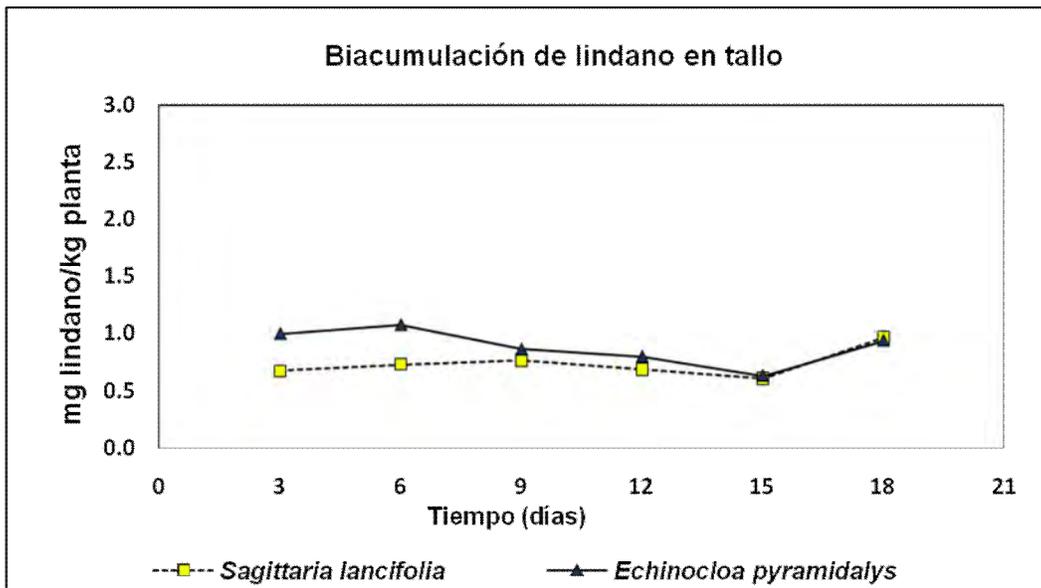
Ver método en ANEXO 2.



**Gráfica 5. Bioacumulación en raíz de tres especies vegetales
(mg lindano/kg planta)**

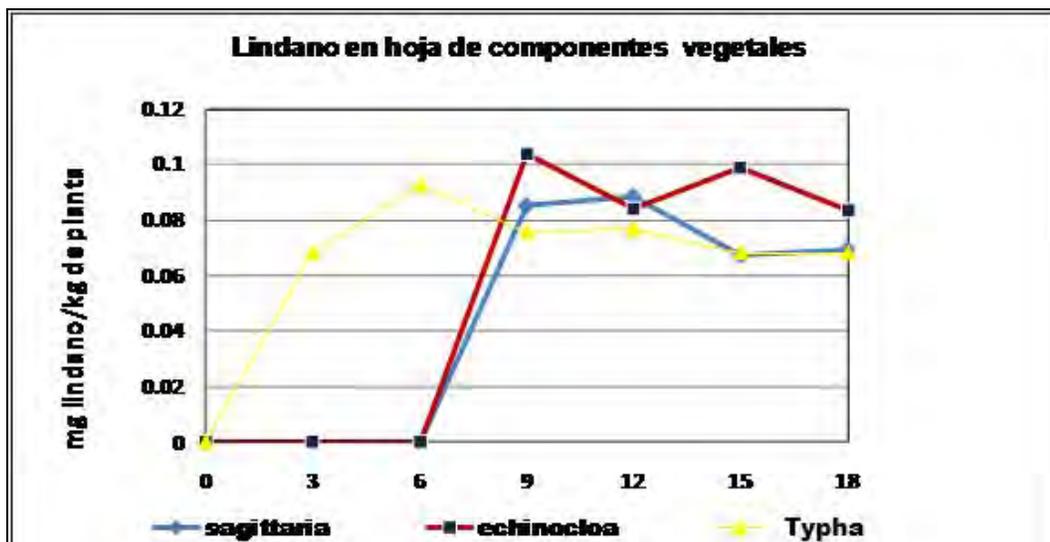
La mayor concentración de lindano detectada en las tres plantas, se presentó en la raíz, donde la concentración bioacumulada fue de 2.22, 1.99 y 1.59 mg de lindano/kg de planta (base seca) en *Sagittaria lancifolia*, *Typha dominguensis* y *Echinocloa pyramidalys*, respectivamente.

Ver método en ANEXO 2.



Gráfica 6. Bioacumulación en tallo de dos especies (mg lindano/kg planta).

Nota: Sólo se cuantificó en dos especies, ya que la planta *Typha* no contenía tallo en estructura. El tallo mayor fue de *Sagittaria lancifolia* con 0.9701 mg de lindano/kg de la planta, en comparación con *Echinochloa pyramidalys* con 0.89 mg de lindano/kg de la planta. (Ver método en ANEXO 2).

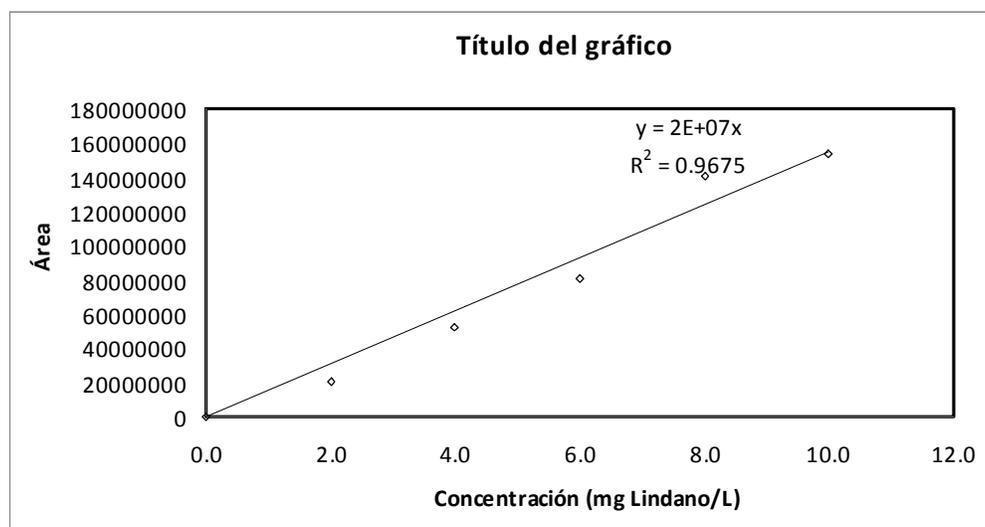


Gráfica 7. Bioacumulación en hoja de tres especies vegetales (mg lindano/kg planta).

La extracción se realizó en 10 g de planta con 60 mL solvente (hexano-acetona 1:1) 10 g/0.06L= 166.67 g/L. (Ver método ANEXO 2).

Tablas 19. Curva Tipo

Cromatografía de gases: Detector de captura de electrones (DCE)				
Soluciones estándar de lindano [mg/L]				
Curva Tipo	Área			DESVIACIÓN
Concentración (mg/L)	M1	M2	Promedio (Área)	ESTANDAR
0.0	0	0	0	0
2.0	2.1344E+07	2.0634E+07	20988838.5	501644.8
4.0	5.4547E+07	5.0552E+07	52549386	2824488.5
6.0	8.2257E+07	7.9145E+07	80701323	2200421.5
8.0	1.4516E+08	1.3717E+08	141162099.5	5649325.6
10.0	1.4357E+08	1.6346E+08	153511679.5	14063573.9



Gráfica 8. Curva Tipo del ensayo de extracción.

PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE FLUJO SUPERFICIAL LIBRE "HAFLS" A ESCALA LABORATORIO

Con base a la información obtenida, es posible proceder al diseño del "HAFLS", considerando el uso de la especie *Sagittaria lancifolia*, colocando 4 ejemplares por metro cuadrado, donde el gasto de alimentación será de 3.47×10^{-5} L/s para lograr un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 3 días a una concentración de 7 mg de lindano/L de agua.

De manera específica, las características del "HAFLS" a escala de laboratorio son las siguientes: El humedal artificial (Figura 24) deberá ser construido en acrílico con las siguientes dimensiones: 0.50 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.20 m de profundidad, respectivamente, debido a la resistencia del acrílico y al fácil manejo. El humedal artificial se alimentará mediante la adición de 9 litros de agua con lindano y se aclimatará durante 20 días, para posteriormente iniciar la operación prevista.

La toma de muestra de agua deberá realizarse cada 3 días a lo largo de 60 días de operación. Al final de la experimentación, se deberá tomar la muestra de especie vegetal a analizar de manera integral o por componente de la misma (rizoma, tallo y hoja). Placas perforadas (cara A y B) con diámetro de $\varnothing_{1/2}$ Pulgadas para conectar tubo PVC, dos perforaciones en la cara B, a una distancia de 0.15 m y 0.03 m de la base del humedal, y otra perforación en la cara A, a 0.15 m de la base del humedal. En la base del humedal se requieren 10 perforaciones con diámetro $\varnothing_{1/2}$, con una separación de 0.10 m entre perforaciones.

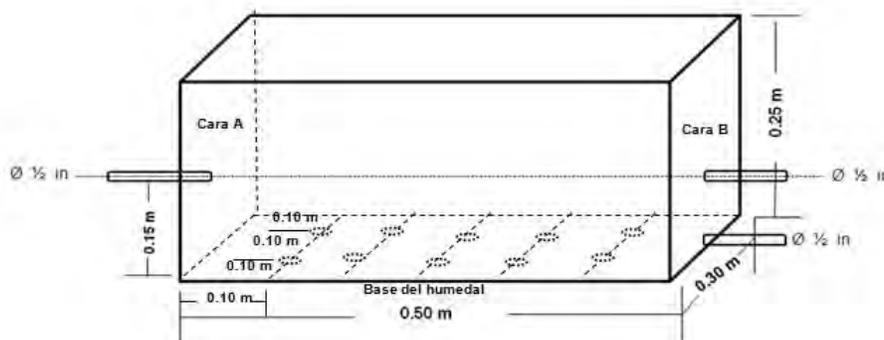


Figura 24. Propuesta de Humedal Artificial "HAFLS" a escala laboratorio

PROCEDIMIENTO OPERATIVO:

A) Acondicionamiento de las unidades experimentales.

Pruebas de resistencia en peso: Se agrega suelo y agua a las proporciones de operación y se verifica que no haya daño alguno en el humedal.

Calor: Se le expone a 24 horas de calor 35 °C y se verifica que no haya daño alguno en el humedal.

Fugas. Prueba de llenado con agua y se verifica que no haya fugas en el reactor.

B) Aclimatación (sin contaminante).

La aclimatación de la especie vegetal es a condiciones de invernadero (18-34°C).

C) Arranque (día 0)

Prueba de Flujo Influyente-efluente, y prueba de fugas del agua.

D) Operación (día 10)

Inicia contacto con el agua contaminada con lindano.

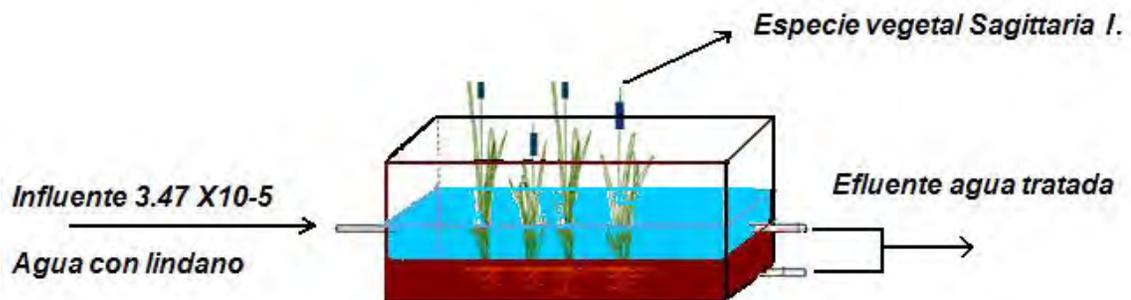


Figura 25. Flujo del Humedal Artificial "HAFLS" a escala laboratorio

En la Figura 26, se puede ver el “HAFLS” construido a escala de laboratorio listo para operar.



Figura 26. Propuesta de Humedal Artificial "HAFLS" a escala laboratorio

5.4 CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos en los fitorreactores, se determinó la concentración de lindano en suelo y en el componente vegetal, encontrándose que la remoción de lindano en suelo fue de 9.74 mg de lindano/kg de suelo a una concentración controlada de 7 mg de lindano/L de agua.
- El fitorreactor con *Sagittaria lancifolia* fue el que alcanzó mayor porcentaje de remoción, con un 48% en 18 días de exposición, mientras que el que contenía *Typha dominguensis* logró 44% y el sembrado con *Echinochloa pyramidalys* removió el 43%.
- El porcentaje de remoción de lindano en raíz fue de 31.71% en la especie *Sagittaria lancifolia*. Es prácticamente el mismo en comparación con el 28.42% de *Typha dominguensis* y mayor que 22.71% de *Echinochloa pyramidalys*, por lo que se concluye que la mayor remoción se realiza en esta zona de la planta.
- La experimentación realizada, permitió proponer el diseño de un “HAFLS” para la depuración de suelo contaminado con lindano, el cual consiste en dos modelos (experimental y testigo) alimentados con lindano a una concentración conocida. La especie vegetal sugerida es *Sagittaria lancifolia*, colocando 4 plantas en cada metro cuadrado de forma que permita cubrir una área simétrica dentro del humedal.
- Se propone que el “HAFLS” sea construido debido a la resistencia física del acrílico, a la poca reacción con el compuesto contaminante y a su fácil manejo, empleando láminas de acrílico con las siguientes dimensiones: 0.50 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.20 m de profundidad, respectivamente. El gasto de alimentación será de 3.47×10^{-5} L/s para lograr un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 3 días.

5.5 RECOMENDACIONES

- Cambiar el material de plástico utilizado para la construcción del fitorreactor por láminas de acrílico para la construcción del “HAFLS”.

- Colocar 4 especies por metro cuadrado dentro del sistema experimental para aumentar el porcentaje de remoción del sistema experimental y analizar resultados.

- Incrementar el tiempo de operación para obtener un mayor número de datos, de esta manera se podrá analizar aún más, y de fondo, el comportamiento de las especies vegetales.

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1) Albitzer J.P. (1971). *Determinación de plaguicidas organoclorados en grasa de canales de bovino sacrificados en el rastro de Ciudad Netzahualcóyotl*, México. P. 21-27. tesis, UNAM.
- 2) Alexander D. y Fairbridge R. (Eds). (1999). *Encyclopedia of Environmental Science*. Klumer, Dordrecht, Poggi-Varaldo H.M., Rinderknecht-Seijas N. (2003). *Acta Biotechnol.* 23: 271-280.
- 3) Avalos Gómez M. y Ramírez Gutiérrez J. (2003). *LA SITUACIÓN DEL LINDANO EN MÉXICO*. *Gaceta Ecológica*, 069 Instituto Nacional de Ecología México, DF pp. 93-100.
- 4) Baker K.H. y Herson D.S. (1994). *Biorremediation*. Ed. McGraw-Hill USA. 375 pp.
- 5) Batstone Smith Jr. y Wilson D. (1989). *Banco Mundial/OMS/PNUMA. The safe disposal of hazardous wastes: the special needs and problems of developing countries*. Vols. I-III. *Documento Técnico del Banco Mundial N° 93*. Washington, D.C.
- 6) Benefield L.D. y Randall C.W. (1980). *Biological process designs for wastewater treatment*. Practice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- 7) Boone M.D. y James S.M. (2003). *Interactions of an insecticide, herbicide, and natural stressors in amphibian community mesocosms*. *Ecol Appl* 13(3): pp. 829-841.
- 8) Calamari D. y Barg U. (1993). *Hazard assessment of agricultural chemical by simple simulation models. Prevention of water pollution by agriculture and related activities. Proceedings of the FAO Expert Consultation, Santiago, Chile, 20-23 Oct. (1992)*. *Water Report 1*. FAO, Rome. pp. 207-222.

- 9) Cámara Durán O.A. (1994). *Impacto en la agricultura bajo riego sobre la calidad del agua: caso del Valle del Yaqui, Sonora. Ingeniería Hidráulica en México* Vol. IX, Núm. 3, pp. 57-71.
- 10) Comisión para la Cooperación Ambiental. (CCA). (2000). *Documento de decisión sobre el lindano.*
- 11) Crites J. y Tchobanoglous E. (2005). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw Hill. Colombia, 756 pp.*
- 12) De la Vega Salazar M. y Martínez Tabche L. y Macías García C. (1997). *Bioaccumulation of methyl parathion and its toxicology in several species of the freshwater community in Ignacio Ramirez Dam in México. Ecotoxicology Environmental Safety.*; Boone y James. (2003); Peterson. (1994). y Zaga (1998).
- 13) Drizo A., Twohig E., Weber D., Bird S. y Ross D. 2006. *Constructed wetlands for dairy effluent treatment in Vermont: two years of operation. In: Proceedings of the 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, MAOTDR 2006, Lisbon, Portugal, pp. 1611–1621.*
- 14) EPA. (2000). *Environmental Protection Agency, LINDANE. United States.*
- 15) EPA. (2000). *Introduction to Phytoremediation, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, EPA/600/R-99/107.72 p.*
- 16) Etchevers-Barra J. D. (1988). *Análisis químico de suelos y plantas. Volumen 1. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México.*
- 17) FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (1993). *Pesticide residue in food. Evaluations Part I Residues FAO. Plant Production and Protection Paper. pp. 124:351.*

- 18) Fall C., Chaouki J. y Chavarie C. (2000). *Desorptive of pentachlorophenol (PCP) and phenanthrene in soli-water systems. Water Env. Res. 72(2): pp.162-169.*
- 19) García J.E. (1997). *Introducción a los plaguicidas. San José, Costa Rica, EUNED. p. 486.*
- 20) Gee G.W. y Bauder J.W. (1986): *Particle size analysis. En Klute A (Ed. Methods of soil analysis. Part.1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9 ASA/SSSA. Madison, WI, EEUU. pp. 383-409.*
- 21) Gil R. (1999). *El Comportamiento Físico-Funcional de los Suelos.*
- 22) Gómez E.G. y Gómez G. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.*
- 23) Gray S., Kinross J., Read P. y Marland A. (2000). *The nutrient assimilative capacity of Mearl as a substrate for waste treatment. Water Research. 34(8): pp. 2183-2190.*
- 24) Greenway M. (1997). *Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. Water Sci. Technol. 35. pp.135–142.*
- 25) Gudrig H. (1990) *“Use of cement kilns as hazardous Waste incorporators: Opportunities ands Constraints for hazardous Waste disposal in developing Countries”, Agency for international Development, Washington, D.C.*
- 26) Healy M. y Cawley A.M. (2002). *Nutrient processing capacity of a constructed wetland in Western Ireland, Enviromental 31 (5): pp. 1739–1747.*
- 27) Hutchinson S.L., Banks M.K. y Schwab A. (2001). *Phytoremediation at aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. J. Environ. Qual. 30: pp. 395-403.*

- 28) Hutzinger O., Safe S. & Zitko V. (1974): *"The Chemistry of PCB's"* (La química de los bifenilos policlorados). Ohio.
- 29) INE. (Instituto Nacional de Ecología). (2004) <http://www.ine.gob.mx/dgicurg/download>. Fecha de consulta: 10 de Diciembre de 2009. *Proyectos 2003, El lindano en México.*
- 30) INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2003). <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>. Fecha de consulta 20 de Noviembre (2009). *XII Censo General de Población y Vivienda, 2004. México.*
- 31) IWA. (2000). Publishing- *Wetlands System for Water Pollution Control.*
- 32) Kadlec R.H. y Knight R. (1996). *Treatment Wetlands. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL pp. 100-120.*
- 33) Koskinen W. y Harper S. (1990). *The retention process: Mechanisms.p.51-77. In H.H. Cheng Pesticides in the soil environment: Processes, impact, and modeling. SSSA Book Ser.2.SSSA, Madison, WI.*
- 34) Llagas-Chafloque W.A. y Gómez E.G. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Rev. Inst. Inv. FIGMMG. 15(17): pp. 85-96.*
- 35) León A.R. y Aguilar S. (1987). *Materia orgánica. p 85-91. En: Aguilar S., Etchevers B. y Castellano R. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación especial No. 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Estado de México.*

- 36) Lee B.H., Scholz M., Horn A. y Furber A.M. (2005). *Prediction of Constructed Treatment Wetland Performance with Case-based Reasoning, Environ. Eng. Sci. pp. 251-253.*
- 37) Luna Pabello V.M., Durán de Bazúa C., Ramírez Carrillo H. F., Fenoglio Limón F.E. y Sánchez García H. (1997). *Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química. San Luis, Argentina. Año IX, Núm. IX Vol. II: p. 325.*
- 38) Martínez M. (1979). *Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas. Fondo de Cultura Económica. México, DF.*
- 39) Moeller R.E., Burkholder J.M., Wetzel R.G. (1988). *Significance of sedimentary phosphorous to a rooted submersed macrophyte (Najas flexilis) and its algal epiphytes, USA.*
- 40) Navarrete P. (1995). *Contaminación de suelos por productos orgánicos plaguicida. Artículo.*
- 41) Nelson D.W. y Sommers L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon, and organic matter, Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin, USA.*
- 42) NOM-021-RECNAT. (2000). *Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.*
- 43) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación.*

- 44) Ortega C.L. (2010). *Tratamiento de agua contaminada con lindano (plaguicida organoclorados) mediante el uso de humedales artificiales*. En prensa.
- 45) Prakash O., Suar M., Raina V. y Dogra Ch. (2004). *Residues of hexachlorocyclohexane isomers in soil and water samples from Delhi and adjoining areas*. *Curr. Sci.* 87: pp. 73-77.
- 46) Poggi-Varaldo H.M. y Rinderknecht-Seijas N. (2003). *A differential availability enhancement factor for the evaluation of pollutant availability in soil treatments*. *Act Biotechnol.* 23: pp.271-280.
- 47) Rousseau D.P., Vanrolleghem P.A. y De Pauw N. (2004). *Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis*. *Ecol. Eng.* 23(3): pp. 151-163.
- 48) Rueda L. (1994). *Redalyc. La situación del lindano en México*. *Gaceta Ecológica*. p. 100.
- 49) Schafer K.S. (2000). *"Lindane Moves Closer to Elimination"* *Global pesticide Campaigner*. USA.
- 50) Scholz H., Horn M.A. y Furber A.M. (2005). *Prediction of Constructed Treatment Wetland Performance with Case-based Reasoning*, Environmental Engineering Science.
- 51) SEMARNAP-INE. (1999) a. *Lo que usted debe saber sobre los plaguicidas. Serie Plaguicidas No. 1. México*.
- 52) Sheoran A.S. y Sheoran V. (2006). *Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review* *Minerals Engineering* 19 (2), pp.105-116.
- 53) Shindler M. (1999). *Surface diffusion on a lattice with two non-equivalent adsorption sites: repulsive interactions* *Surf. Sci.* pp. 426, 8-25.

- 54) Tanabe S. (2004). *POPs-Need for target research on high risk stage. Marine Pollution Bulletin. 48: pp. 609-610.*
- 55) Tchobanoglous G. y Schorodoeder E. D. (1985). *Water quality: Characteristics, modeling, modification. Addison-Wesley, Reading, MA. 756 pp.*
- 56) Thiessen H. y Moir J.O. (1993). *Characterization of available P by sequential extraction. 75–86 p.. In MR Carter (ed) Soil sampling and methods of analysis Lewis Publ, Boca Raton, FL.*
- 57) Toop G.C. (1993). *Soil water content. In: soil sampling and methods of analysis. Martin R. Carter Editor. Canadian Society of soils Science. Lewis Publisher. pp. 541-557.*
- 58) Van Deuren J., Wang Z. y Ledbetter J. (1997). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation. 294 pp.*
- 59) Zaga A., Little E.E., Rabeni C.F., Ellersieck M.R. (1998). *Photoenhanced toxicity of a carbamate insecticide to early life stage anuran amphibians. Environ. Toxicol. Chem. 17(12): pp. 2543-2553.*

7 ANEXOS

ANEXO 1

➤ SELECCIÓN DE TRES ESPECIES VEGETALES DE ZONA DE ESTUDIO

Para seleccionar la planta de mayor tolerancia al lindano, se llevó a cabo una selección de tres especies vegetales localizadas en la Cuenca del Papaloapan, las cuales fueron aclimatadas a condiciones de humedales a escala laboratorio (18 a 34 °C), EPA, 2000.

La selección de tres especies vegetales aclimatadas a las condiciones de humedales naturales, localizados en la Cuenca del Papaloapan, fue realizada para finalmente seleccionar la planta de mayor tolerancia al lindano, las cuales fueron aclimatadas a condiciones de laboratorio.

Se buscó que las plantas presentarán las siguientes características:

- Ser monocotiledóneas herbáceas de amplia distribución en humedales naturales.
- La variación de la velocidad de remoción de contaminante por parte de la especie seleccionada.
- Rapidez en la tasa de crecimiento de las especies vegetales y alta productividad.
- Rapidez de acumulación del contaminante en tejido de la especie vegetal.
- Ser tolerante a altas concentraciones de plaguicidas.
- Ser especies locales representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables.
- Ser acumuladoras de plaguicidas.
- Menos de 0.25 m de altura.

ANEXO 2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ADSORCIÓN-DESORCIÓN

Tablas 20. Concentración de lindano (Ensayo de Adsorción mg/L)

	Área	Área	Promedio	Desviación	L. en S.	L.S.A.	L.S.A.	L.S.A.
Concentración	Muestra 1	Muestra 2	Área	Estándar	X mg/L	mg lindano/ en m. suelo	mg lindano/g en suelo	mg lindano/kg en suelo
(0.0 mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.5 mg/L)	5091900	4861400	4.977 E+06	162988	4.9767 E-01	2.3 E-03	4.67 E-04	0.467
(1.0 mg/L)	9942800	9897900	9.920 E+06	31749	0.992035	8.0 E-03	15.9 E-04	1.593
(2.0 mg/L)	19815900	19917200	19.866 E+06	71629	1.986655	13.3 E-03	26.6 E-04	2.669
(4.0 mg/L)	39091000	40381200	39.736 E+06	912309	3.97361	26.4 E-03	52.7 E-04	5.278
(5.0 mg/L)	4.91E+07	5.02E+07	49.664 E+06	771453	4.96645	33.6 E-03	67.1 E-04	6.71
(7.0 mg/L)	7.05E+07	6.85E+07	69.513 E+06	1417042	6.9513	48.7 E-03	97.4 E-04	9.74

Tablas 21. Concentración de lindano (Ensayo de desorción mg/L)

			Área	Área		L. D. S.	L. D. S.	L. D. S.	L. D. S.
Lavado del suelo	Muestra	Concentración	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Concentración mg/L	Concentración mg lindano/g suelo	Concentración mg lindano/kg suelo	
Desorción (1)	Extracción 7	(7.0 mg/L)	504270	487540	495905	0.04959	0.00991	9.9181	7 mg/L
Desorción (2)	Extracción 7	(7.0 mg/L)	465897	445380	455638.5	0.04556	0.00911	9.1127	4 mg/L
Desorción (3)	Extracción 7	(7.0 mg/L)	374532	355690	365111	0.03651	0.00730	7.3022	1.5 mg/L
Desorción (4)	Extracción 7	(7.0 mg/L)	311234	306548	308891	0.03088	0.00617	6.1778	1.3 mg/L
Desorción (5)	Extracción 7	(7.0 mg/L)	151346	175769	163557.5	0.01635	0.00327	3.2711	1.1 mg/L

Tablas 22. Bioacumulación en especies vegetales (mg de lindano/kg de planta)

Promedio				Desviación estándar		
Día	Typha dominguensis	Sagittaria lancifolia	Echinocloa pyramidalys	Typha dominguensis	Sagittaria lancifolia	Echinocloa pyramidalys
3	2.0292	2.3524	2.1430	0.2771	0.3979	0.2389
6	2.7826	2.8988	2.4727	0.2139	0.2239	0.2317
9	2.7221	3.1190	2.3324	0.2240	0.2087	0.1488
12	2.9601	3.1569	2.5534	0.1798	0.0761	0.1014
15	2.8474	3.1424	2.7023	0.1744	0.1948	0.0758
18	3.1035	3.4198	3.0329	0.1265	0.1946	0.1297

Tablas 23. Bioacumulación de lindano en raíz (mg de lindano/kg de planta)

Raíz			
Día	Typha dominguensis	Sagittaria lancifolia	Echinocloa pyramidalys
3	1.3453	1.6753	1.1398
6	1.8572	2.1635	1.3911
9	1.9652	2.2639	1.3630
12	2.1918	2.3783	1.6673
15	2.1636	2.4652	1.9681
18	2.4219	2.3801	2.0056

Tablas 24. Bioacumulación de lindano en tallo (mg de lindano/kg de planta)

Tallo		
Día	Sagittaria lancifolia	Echinocloa pyramidalys
3	0.6771	1.0032
6	0.7353	1.0817
9	0.7699	0.8655
12	0.6899	0.8021
15	0.6099	0.6352
18	0.9701	0.9439

Tablas 25. Bioacumulación de lindano en hoja (mg de lindano/kg de planta)

Hoja			
Día	Typha dominguensis	Sagittaria lancifolia	Echinocloa pyramidalys
3	0	0	0.0683
6	0	0	0.0925
9	0.0853	0.1038	0.0756
12	0.0887	0.0840	0.0768
15	0.0673	0.0990	0.0683
18	0.0696	0.0834	0.0681

ANEXO 3

pH. MÉTODO POTENCIOMÉTRICO

Fundamento

El *método potenciométrico o electroquímico* para medir pH de un suelo es el más utilizado. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones H⁺ (electrodo de vidrio) presentes en una solución problema. Como referencia se usa un electrodo cuya solución problema no se modifica cuando cambia la concentración de los iones por medir, que es generalmente un electrodo de calomelano o de Ag/AgCl. El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. En la práctica se utilizan soluciones amortiguadoras de pH conocido, para calibrar el instrumento y luego comparar, ya sea el potencial eléctrico, o el pH directamente de la solución por evaluar.

Interferencias

Debido a que el pH del suelo es medido en una matriz acuosa como agua o una solución de sales diluidas, es dependiente del grado de dilución (relación suelo-dilución). Cuando se mide en agua es importante controlar el agua adicionada, ya que un aumento causará un incremento en pH; por ello es necesario mantener la relación constante y tan baja como sea posible.

Sin embargo, la solución sobrenadante puede no ser suficiente para sumergir el electrodo apropiadamente sin causar mucho estrés cuando se inserta dentro del suelo. Los suelos con alta cantidad de materia orgánica tienden a formar una gruesa pasta seca, por lo que una relación menor de muestra en agua puede ser aceptable (1:5 o 1:10) (Karma A, 1993). En suelos contaminados con hidrocarburos la interferencia va a depender de la concentración y tipo de hidrocarburo, se puede producir desde una simple iridiscencia sin afectar la determinación, hasta un impedimento de la determinación por la alta concentración y viscosidad del contaminante.

Material y equipo

- Muestra de suelo
- Balanza analítica
- Vasos de precipitado de 25 mL
- Pipeta de 10 ml
- Piceta con agua destilada
- Potenciómetro
- Agua destilada
- Solución amortiguadora de pH 7 y 4
- Agitadores magnéticos

Procedimiento

- 1) Pesar 1 g de suelo y colocarlo en un vaso de precipitado de 25 mL.
- 2) Agregar 10 mL de agua destilada.
- 3) Agitar y dejar reposar 10 minutos.
- 4) Ajustar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras.
- 5) Pasados los 10 minutos, medir el pH con el potenciómetro.

Categoría Valor de pH



Figura 27. Escala de pH

Tablas 26. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH

Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	8.5

Las características del suelo como tipo y tamaño de partícula, en conjunto con las plantas, son los componentes de la parte hidráulica. El suelo con una estructura estable proporciona condiciones óptimas para la conductividad.

En cuanto a la textura del soporte, es recomendable evitar arreglos a base de arena fina y/o arcilla (con diámetros menores a 0.5 mm), debido a que son materiales fácilmente compactables e inestables, limitan la infiltración y la conductividad hidráulica del sistema (Drizo *et al.*, 2006). Es por este motivo que en este trabajo, se determinaron los materiales y diámetros de partícula mediante pruebas fisicoquímicas en el laboratorio.

HUMEDAD

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. Además, intemperiza las rocas y los minerales, ioniza los macros y micronutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial. El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Topp, 1993).

Aunque es recomendable determinar la humedad a la capacidad de campo de los suelos, es decir, la cantidad de humedad que un suelo retiene contra la gravedad cuando se deja drenar libremente; cuando se trata de suelos contaminados por ejemplo con hidrocarburos del petróleo, es difícil llevar a cabo esta medición por la dificultad de rehidratar suelos secos con estas características. Por lo que la medición de humedad se realiza sólo en función del porcentaje de agua que retiene este tipo de suelos.

Método

El método utilizado para esta medición es el gravimétrico, para determinar únicamente la cantidad de agua de los suelos.

Fundamento

La humedad del suelo se calcula por la diferencia de peso entre una misma muestra húmeda, y después de haberse secado en la estufa hasta obtener un peso constante.

Material y equipo

- Muestras de suelo
- Balanza analítica
- Espátula
- Charolas o papel aluminio a peso constante
- Estufa

Procedimiento

- 1) Pesar 1 g de muestra sobre un papel o charola de aluminio a peso constante.
- 2) Colocar la muestra dentro de la estufa a 80°C de 12 a 24 horas.

- 3) Sacar la muestra de la estufa y colocarla dentro de un desecador para que se enfríe.
- 4) Pesar la muestra con todo y papel.
- 5) Calcular los porcentajes de humedad en el suelo por la diferencia de pesos.

$$\% \text{ Humedad del suelo} = (\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) / \text{Peso inicial} * 100$$

CARBONO ORGÁNICO TOTAL

El carbono orgánico es uno de los principales componentes de los seres vivos: aproximadamente 50% del peso seco de la materia orgánica (M.O.) es carbono. En el medio ambiente su ciclo está estrechamente ligado al flujo de energía, debido a que las principales reservas de energía de los organismos son compuestos de carbono reducidos que han derivado de la fijación del CO₂ atmosférico, ya sea por medio de la fotosíntesis o, con menor frecuencia de la quimiosíntesis (Thiessen y Moir, 1993). Las plantas y los animales que mueren son desintegrados por los microorganismos, en particular bacterias y hongos, los cuales regresan el carbono al medio ambiente en forma de bióxido de carbono (Baker y Herson, 1994).

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en el suelo; y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición es muy amplia pues incluye, tanto a los materiales poco alterados, como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y resíntesis dentro del suelo.

Además se pueden incluir compuestos orgánicos tóxicos, provenientes de las actividades industriales del hombre, como la contaminación de suelos por hidrocarburos del petróleo, que también constituye parte de la materia orgánica del suelo (Etchevers, 1988).

Tablas 27. Categoría de muestra de suelo (mmhos/cm)

No salino	0 - 2.0
Poco salino	2.1 - 4.0
Moderadamente salino	4.1 - 8.0
Muy salino	8.1 - 16.0
Extremadamente salino	> 16.0

En la Tabla 27 se muestran los parámetros para caracterizar suelos.

Método

Para la cuantificación de carbono orgánico total se utiliza un analizador de carbono con una cámara de combustión y un detector de infrarrojo.

Fundamento

La muestra de suelo es colocada dentro de la cámara de combustión a una temperatura de 900°C, proceso que provoca la liberación de CO₂ proveniente de todo el carbono presente en el suelo. El CO₂ es cuantificado con un detector de infrarrojo.

El límite de detección de la técnica va de 0 a 25 mg de C. Considerando que no todo el suelo es materia orgánica (M. O.), se recomienda utilizar muestras de 0.1 a 0.3 g, pero mientras más M.O. se tenga, se debe tomar menor cantidad de suelo para realizar esta técnica.

Material y equipo

- Muestra de suelo seco y molido en mortero
- Cápsulas de porcelana especiales para el equipo de carbono total
- Espátulas

- Analizador de carbono con detector de infrarrojo y accesorio para muestras sólidas
- Balanza analítica
- Pinzas

Procedimiento

Esta técnica puede realizarse con muestras de suelo húmedo, pero se recomienda utilizar suelo seco y molido para homogeneizar la muestra, ya que se utilizan cantidades muy pequeñas (menores que 0.3 g).

- 1) Pesar suelo seco (0.1 a 0.3g) dentro de una cápsula de porcelana.
- 2) Encender el analizador de carbono y esperar a que la temperatura del horno llegue a 900°C. Una vez que el equipo esté estabilizado a esta temperatura, se procede a analizar las muestras.
- 3) El método utilizado para hacer los análisis en este equipo debe indicar que se está utilizando el accesorio para muestras sólidas; y en caso de contar con un software para la integración de los datos, se debe incluir la curva patrón para que el resultado de la medición se proporcione con base en ésta.
- 4) Colocar la muestra dentro de la cámara de sólidos y proceder a la medición.
- 5) El tiempo de corrida de cada muestra es aproximadamente de cinco minutos. Al final el software presenta la cantidad de carbono (mg/kg suelo o en porcentaje) contenido en el suelo.
- 6) El resultado debe ser ajustado por la humedad de la muestra, para indicarlo en mg de c/kg. Suelo completamente seco.

Curva patrón. Se realiza con biftalato de potasio ($C_6H_4(COOK)_2$) en un rango de concentraciones de 0 a 25 mg (0 a 0.025 g) de carbono contenido en este compuesto. El biftalato debe secarse en la estufa durante 12 horas a 60°C antes de ser analizado. Pesar la cantidad necesaria del reactivo para obtener la concentración deseada (de 0 a 25 mg de carbono en la muestra) y hacer la medición de carbono orgánico total en el analizador, como se indicó para las muestras.

Cálculos

Calcular la cantidad de carbono orgánico total (COT) contenido en el suelo con la ecuación lineal de la curva estándar.

$$CO \text{ (mg)} = (A - b) / m$$

Donde:

CO = carbono orgánico (mg) contenido en el suelo

A = área del pico obtenido

b = ordenada al origen

m = pendiente

Calcular la concentración final de COT de la muestra de suelo mediante la siguiente ecuación: $COT \text{ (mg / kg de suelo seco)} = CO \text{ (mg)} * 1\,000 / P * FH$

COT = carbono orgánico total (mg / kg de suelo seco)

CO = carbono orgánico (mg)

P = cantidad de suelo (0.1 g a 0.5 g)

1 000 = factor de corrección de concentración (1 000 g = 1 kg)

FH = factor de corrección de humedad = $(1 - (\% \text{humedad} / 100))$

A partir del contenido total de carbono orgánico se puede estimar el contenido de materia orgánica; suponiendo de forma convencional que la materia orgánica contiene 58% de carbono. Así, el contenido de carbono orgánico se multiplica por el factor 1.724 para obtener el contenido de materia orgánica (León y Aguilar, 1987).

DETERMINACIÓN DE TEXTURA

(Tamaño de las partículas de los suelos)

Introducción

La textura del suelo es la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla, las cuales al combinarse permiten categorizar al suelo en una de las 12 clases de textura.

Método

La determinación del tamaño de partículas del suelo puede realizarse entre otros métodos por el procedimiento de la pipeta.

Interferencias

En el caso de suelos contaminados con hidrocarburos, si no se realiza una buena eliminación de la materia orgánica (que incluye a los hidrocarburos), ésta puede interferir con la determinación.

Principio y aplicación

El método de la pipeta es un procedimiento de muestreo directo que consiste en tomar una submuestra (alícuota) de una suspensión de suelo en agua, donde se está llevando a cabo un proceso de sedimentación, determinando el tipo de partícula en función de su velocidad de sedimentación.

La submuestra es tomada a una profundidad h y a un tiempo t , en el que todas las partículas con diámetro mayor o igual que 0.002 mm han sedimentado, teniéndose en las alícuotas únicamente partículas pertenecientes a la fracción arcillosa. El método se basa en la Ley de Stokes.

Material y equipo

- Hexametáfosfato de sodio 1 N
- Agua destilada
- Agua oxigenada al 6%
- Pipeta lowy
- Botellas de 250 mL
- Tamices de 300 mallas
- Botes de aluminio
- Cápsulas de porcelana
- Estufa de aire forzado
- Suelo sin materia orgánica
- Agitador eléctrico
- Agitador de vidrio
- Plancha eléctrica graduable

Procedimiento

Pretratamiento de la muestra, digestión de la materia orgánica (M.O.).

- 1) Tomar 100 g de suelo seco, tamizarlo a través de una malla de 2 mm y colocarlo en un vaso de precipitado de 1 L, agregar agua destilada hasta cubrir el suelo.
- 2) Adicionar 10 mL de agua oxigenada al 6% y con el agitador de vidrio revolver durante 10 minutos.
- 3) Agregar otros 10 mL de agua oxigenada y observar si se da una reacción violenta con producción de espuma; si esto sucede agregar 10 ml de agua oxigenada cada 15 minutos, hasta que no se produzca espuma.
- 4) Colocar el vaso en la parrilla o plancha eléctrica ubicada dentro de la campana de extracción, y calentar hasta 90°C.
- 5) Verter 10 mL más de agua oxigenada y observar la intensidad de la reacción. Si la reacción es violenta (mucho espuma), añadir una dosis más de 10 mL de agua oxigenada hasta que no se forme espuma.

- 6) Después de la última adición de agua oxigenada, continuar calentando para eliminar el posible exceso de agua oxigenada. Se recomienda un tiempo mínimo de 45 minutos.
- 7) Pasar el suelo a un recipiente de aluminio, usando agua destilada si es necesario.
- 8) Introducir el recipiente a la estufa para secar a 105°C hasta tener peso constante.
- 9) Vaciar la muestra en un mortero, moler y tamizar a través de una malla de 2 mm.

Procedimiento para la determinación de textura

- 1) Pesar 5 g de suelo seco, sin materia orgánica, molerlo y posteriormente tamizarlo a través de una malla de < 2 mm.
- 2) Colocar la muestra en una botella de 250 mL.
- 3) Agregar a la botella con suelo 10 mL del dispersante hexametafosfato de sodio.
- 4) Llevar a aproximadamente 50 mL con agua destilada.
- 5) Agitar la botella con suelo, agua y dispersante por 5 minutos, dejar reposar por 12 horas.
- 6) Después del periodo del reposo, agitar la suspensión por 30 minutos con un agitador eléctrico.
- 7) Pasar la suspensión por el tamiz de 300 mallas, recogiendo el filtrado en cápsulas de porcelana. Usar la menor cantidad de agua para separar la arena que quedará en el tamiz; la arcilla y el limo quedará en la suspensión.
- 8) Pasar el filtrado a la botella de 250 mL y agregar agua destilada hasta que se tenga un volumen de 200 mL.
- 9) Agitar la suspensión durante 2 minutos y dejar reposar por 1 hora 21 minutos 40 segundos, después se toma una alícuota de 25 mL a la profundidad de 2 cm.
- 10) Colocar la alícuota de 25 mL en un bote de aluminio previamente pesado y secar en estufa a 105°C hasta peso constante. Poner la muestra a enfriar en el desecador y pesar.

11) Las arenas retenidas en el tamiz de 300 mallas pasarlas a un recipiente de aluminio previamente pesado y poner a secar en la estufa a 105°C hasta peso constante.

Cálculos

$$\% \text{ de arena} = (B/A) \times 100$$

Donde:

A = peso de la muestra

B = peso de arenas

$$\% \text{ de arcilla} = (E / A) \times 100$$

$$C = \text{peso de arcilla} + \text{limo} = (A - B)$$

$$\% \text{ de limo} = (F / A) \times 100$$

D = peso del suelo en la alícuota (partículas < 0.002 mm)

E = peso de arcilla = D x 8

F = peso del limo = A - B - E

Con los porcentajes de arena, limo y arcilla, y mediante el uso del triángulo de textura, se determina la textura del suelo como se ve en la Figura 28.

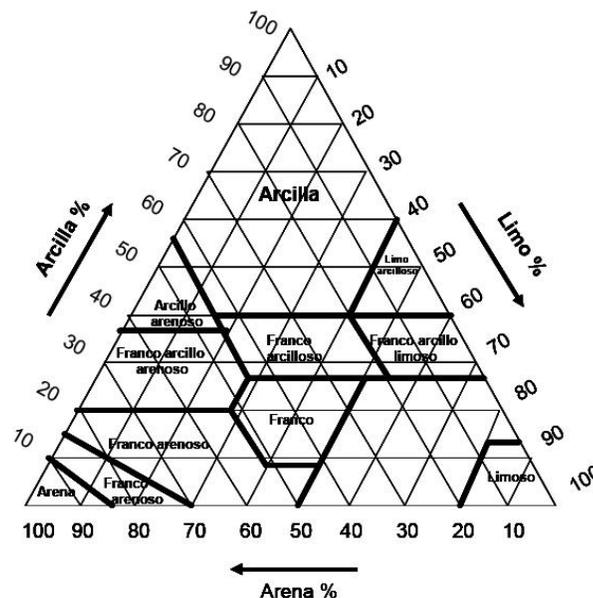


Figura 28. Triángulo de textura del sistema de clasificación de la USDA

ANEXO 4

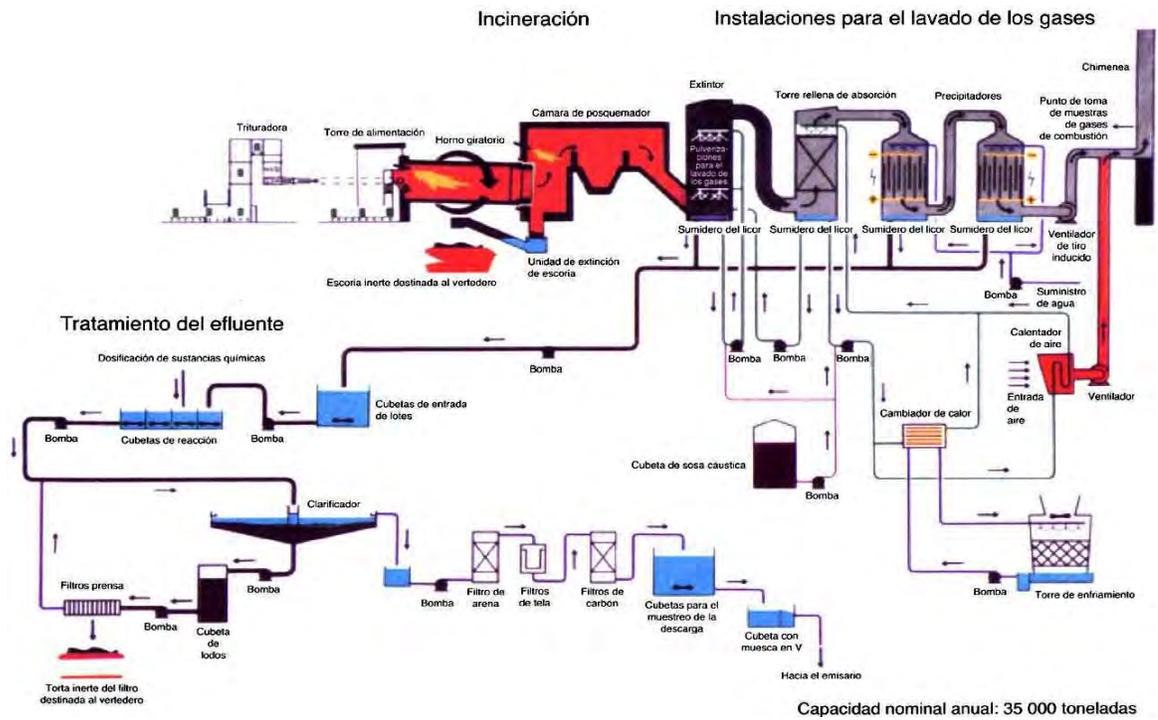


Figura 29. Esquema del Horno de procesamiento de cemento

ANEXO 5



<p style="text-align: center;"> LINDANO gamma-1,2,3,4,5,6-Hexaclorociclohexano Hexacloruro de gamma-benceno $C_6H_6Cl_6$ Masa molecular: 290.8 N° CAS 58-89-9 N° RTECS GV4900000 N° ICSC 0053 N° NU 2761 N° CE 602-043-00-6 </p>			
	PELIGROS/ SÍNTOMAS AGUDOS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes. Los preparados líquidos que contengan disolventes orgánicos pueden ser inflamables.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión si los preparados contienen disolventes inflamables, explosivos.		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones, rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR LA DISPERSIÓN DEL POLVO! ¡HIGIENE ESTRICTA! ¡EVITAR LA EXPOSICION DE ADOLESCENTES Y NIÑOS!	¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!

INHALACIÓN	Tos, convulsiones, vértigo, dolor de cabeza, náuseas, debilidad, temblores, parestesia. Síntomas no inmediatos.	Evitar la inhalación de polvo fino y niebla. Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
PIEL	¡PUEDE ABSORBERSE!	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón y proporcionar asistencia médica. Utilizar guantes protectores cuando se presten primeros auxilios.
OJOS	Enrojecimiento	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
INGESTIÓN	Dolor abdominal, diarrea (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos cuidadosamente antes de comer.	Enjuagar la boca. Dar a beber una papilla de carbón activado y agua. NO provocar el vómito. Reposo y proporcionar asistencia médica.

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
<p>NO verterlo al alcantarillado. Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente no-metálico precintable y trasladarlo a continuación a un lugar seguro. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. (Protección personal adicional: respirador de filtro P3 contra partículas tóxicas).</p>	<p>A prueba de incendio. Medidas para contener el efluente de extinción de incendios. Separado de bases, alimentos y piensos, metales y polvos metálicos. Mantener en lugar seco.</p>	 <p>No transportar con alimentos y piensos.</p> <p>símbolo T símbolo N R: 23/24/25-36/38-50/53 S: (1/2-)13-45-60-61 Clasificación de Peligros NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: III IMO: Contaminante marino severo. CE:</p>
VEASE AL DORSO INFORMACIÓN IMPORTANTE		
ICSC: 0053	Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994.	

8 LINDANO

DATOS IMPORTANTES	VÍAS DE EXPOSICIÓN	
	ESTADO FÍSICO; ASPECTO Polvo cristalino blanco, inodoro.	La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.
	PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire.	RIESGO DE INHALACIÓN La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire cuando se dispersa.
	PELIGROS QUÍMICOS En contacto con superficies calientes o con llamas, esta sustancia se descompone formando humos tóxicos y corrosivos, incluyendo fosgeno y cloruro de hidrógeno. La sustancia se descompone en contacto con álcalis, produciendo triclorobenceno, o en contacto con polvo de hierro, aluminio y cinc.	EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a convulsiones, fallo respiratorio y colapso. La exposición puede producir la muerte. Se recomienda vigilancia médica.
LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV(como TWA): 0.5 mg/m ³ A3 (piel) (ACGIH 1997-1998).	EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar al hígado y al riñón.	
PROPIEDADES FÍSICAS	Punto de ebullición: 323°C Punto de fusión: 113°C Densidad relativa (agua = 1): 1.87 Solubilidad en agua: Ninguna.	Presión de vapor, Pa a 20°C: 0.0012 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 10 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 3.61- 3.72
DATOS AMBIENTALES		La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos. En la cadena alimentaria referida a los seres humanos tiene lugar bioacumulación, concretamente en peces. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente, especialmente en el suelo.
NOTAS		
Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Los disolventes usados en formulaciones comerciales pueden modificar las propiedades físicas y toxicológicas. No puede indicarse la relación entre el olor y el límite de exposición laboral. NO llevar a casa la ropa de trabajo. Nombres comerciales: Gammexane, Tri-6, Lindafor, Lindatox, Agrocide, Isotox, Esoderm, Aparasin.		
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-61G53c Código NFPA: H 2; F 0; R 0;		

INFORMACIÓN ADICIONAL	
FISQ: 5-114 LINDANO	
ICSC: 0053	LINDANO
© CCE, IPCS, 1994	
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

Figura 30. Hoja de seguridad de lindano