



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**DETERMINACIÓN DE PLAGUICIDAS ORGANOCLORADOS EN UN
HUMEDAL CONSTRUIDO EN LA EXHACIENDA DE OCOTZÁ, HIDALGO.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

ESMERALDA HERNÁNDEZ RAMÍREZ

DIRECTORA DE TESIS: M. en C. LOURDES CASTILLO GRANADA

ASESOR INTERNO: M. en C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS



JUNIO 2014

*“Si un día tienes que elegir entre el mundo y el amor, Recuerda:
Si eliges el mundo quedarás sin amor,
pero si eliges el amor,
con él conquistarás al mundo”*

Albert Einstein

¿Qué es el hombre dentro de la naturaleza?

Nada con respecto al infinito.

Todo con respecto a la nada.

Un intermedio entre la nada y el todo.

Blaise Pascal

AGRADECIMIENTOS

Gracias... Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formar parte en las estadísticas de graduados de "la máxima casa de estudios".

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, doy gracias por abrir sus puertas para estudiar Biología. Disfrute mucho tiempo mi estancia en este lugar. Me deja muy gratos recuerdos su pista de atletismo, su gimnasio, sus laboratorios, sus aulas, su biblioteca, sus áreas verdes... en fin todos los lugares que guarda esta institución: Sus maestros que contribuyeron en mi avance académico y personal para ser la bióloga que soy; y... como olvidar a mis compañeros y amigos con los que conviví durante la licenciatura. Me siento muy afortunada y orgullosa por haber cursado mis estudios en la FES ZARAGOZA.

A mis sinodales Lourdes Castillo Granada, Eliseo Cantellano de Rosas, Maricela Arteaga Mejía, Leticia López Vicente y Ernesto Constanzo Casillas. Por sus valiosas aportaciones para enriquecer este trabajo y lograr el producto final. Gracias por su tolerancia, apoyo, comprensión y gran disposición.

A mis maestras Lourdes Castillo Granada y Maricela Arteaga Mejía, por ser ejemplo de superación, profesionalismo y amabilidad. Siempre recordaré sus consejos, sus muestras de apoyo y el gran empeño académico para lograr este trabajo. Mil gracias por todas sus contribuciones en mi crecimiento personal y académico.

A todos los maestros que conocí durante mi estancia en la Facultad. Gracias!!!

DEDICATORIAS

Con mucho amor y respeto para el sr. MARCELO HERNANDEZ TENZA, que siempre tuvo palabras de cariño, de apoyo y de confianza... para el hombre que no tuvo la oportunidad de acompañarme en este logro pero que sin duda en el lugar que se encuentra estará lleno de regocijo por este trabajo de varios años de espera. Por eso... Le regalo a mi papá, una sonrisa de plata, que es la que alumbró mi cara, cuando de noche me tapa. Le regalo a mi papá, una oración en la que quepan mis bendiciones y besos envueltos en un regalo. Le regalo a mi papá este trabajo para agradecerle sus enseñanzas y múltiples recuerdos. ¡¡Dedicado a tú memoria papá!!

A mi querida mamá Lucia Ramírez Rojas, por tu esfuerzo y dedicación en mi crianza... siempre pondré en práctica tus enseñanzas, sin duda nada saldrá mal pues...tus enseñanzas me harán fuerte en los momentos difíciles y humilde cuando me equivoque. Gracias mamá por todo lo que me has dado sé que no ha sido fácil, pero estás aquí conmigo y eso es importante para mí.

A ti mi pequeña Tam, que eres el motivo de mi vida y que haces latir mi corazón, por ser la maestra que me ha hecho madurar por dentro y me ha enseñado el valor de la vida. Este trabajo es para ti mi Tam, recíbelo con todo el amor del mundo. Recuerda que siempre estaré junto a ti. Gracias por tus sonrisas que me llenan de energía para culminar mis metas.

A mi esposo Gustavo Gómez Martínez, le agradezco por darme una hija tan hermosa, cariñosa, honesta, comprensiva e inteligente... mi mayor tesoro. Aunque a veces podamos discutir o tener nuestras diferencias, los vínculos que nos unen son más poderosos. Es tan bueno estar juntos y saber que pese a todo, puedo contar con tu amor y comprensión. Gracias por todo!!

Con cariño a mis hermanos (Eduardo, Rogelio, Rubén, Alfredo y Raymundo), con todas sus cualidades y defectos, sé que me quieren. La vida ha sido generosa conmigo al regalarme hermanos como ustedes, con los que he vivido tantas cosas buenas, malas y hasta tristes. Pero esto solo hace más fuerte el lazo que nos mantiene unidos. Los buenos momentos son más agradables, siempre que los podamos compartir entre hermanos. Y tal como lo hemos venido haciendo desde la infancia, me gustaría que nunca se terminaran.

A Corina, Tonalli y Gaspar por su compañía y momentos de alegría.

La suerte siempre ha estado de mi lado, por permitirme estar en una familia feliz. Sé que hay personas que no cuentan con este privilegio y por eso hoy quiero decirles, que siempre serán invaluablees para mí.

ÍNDICE

1. RESUMÉN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1 Plaguicidas organoclorados.....	3
3.2 Degradación de plaguicidas organoclorados.....	4
3.3 Calidad del agua.....	7
3.4 Aguas residuales.....	9
3.4.1 Composición de las aguas residuales.....	10
3.4.2 Depuración de aguas residuales.....	14
3.4.2.1 Tratamiento primario.....	14
3.4.2.2 Tratamiento secundario.....	16
3.4.2.3 Tratamiento terciario.....	18
3.5 Humedales.....	18
3.5.1 Clasificación de humedales construidos.....	21
3.5.2 Componentes de los humedales construidos.....	24
3.5.2.1 Estructuras de distribución de aguas residuales.....	24
3.5.2.2 Sustrato.....	24
3.5.2.3 Vegetación.....	25
3.5.2.4 Microorganismos.....	26
3.5.3 Mecanismos de depuración que actúan en los humedales.....	27
3.6 Métodos biológicos para el tratamiento de aguas residuales.....	29
3.6.1 Restauración.....	29
3.6.2 Remediación.....	29
3.6.2.1 Degradación enzimática.....	30
3.6.2.2 Remediación microbiana.....	31
3.6.2.3 Fitorremediación.....	32

4. ZONA DE ESTUDIO.....	37
4.1 Extensión.....	37
4.2 Orografía.....	37
4.3 Hidrografía.....	37
4.4 Clima.....	38
4.5 Flora.....	38
4.6 Fauna.....	38
4.7 Clasificación y uso de suelo.....	38
5. JUSTIFICACIÓN.....	39
6. HIPÓTESIS.....	39
7. OBJETIVOS.....	40
7.1 General.....	40
7.2 Particulares.....	40
8. MÉTODO.....	41
8.1 Etapa de campo.....	41
8.2 Etapa de laboratorio.....	42
8.3 Etapa de gabinete.....	42
9. RESULTADOS.....	43
10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
11. CONCLUSIONES.....	61
12. RECOMENDACIONES.....	62
13. REFERENCIAS.....	63
ANEXOS.....	70
I. Ventajas e inconvenientes de los humedales.....	70
II. Plaguicidas organoclorados.....	72
III. Características físicas y químicas de los plaguicidas organoclorados.....	77
IV. Ventajas y limitaciones de la fitorremediación.....	78
V. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81.....	79
VI. Cromatogramas.....	80



1. RESUMÉN

Las aguas residuales en ambientes agrícolas pueden presentar desechos de pesticidas organoclorados que pueden dañar la salud humana por su amplia capacidad de dispersión, su alta estabilidad química, pero, sobre todo que son muy solubles en grasas y se adhieren fácilmente a partículas suspendidas de agua y sedimentos de los ecosistemas acuáticos. Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales son los humedales construidos por su capacidad natural de remover contaminantes como los plaguicidas organoclorados.

El presente trabajo se llevó a cabo en un humedal construido en la exhacienda de Ixmiquilpan Hidalgo. Se evaluaron los niveles de plaguicidas organoclorados presentes en el cuerpo de agua durante los meses abril, mayo, junio, julio y octubre del 2005.

La extracción, purificación y determinación de plaguicidas organoclorados se realizó mediante la técnica de cromatografía de gases con detector de captura de electrones de acuerdo a los procedimientos marcados por la NOM-AA-71 y el método 508-EPA.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los plaguicidas que se encontraron presentes en el humedal en algunos casos rebasaron ligeramente los límites permitidos para su uso acuícola y piscícola establecido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89).



2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en México las condiciones de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico no son del todo satisfactorias, ya que solo el 85% y 78% de la población respectivamente cuentan con acceso a estos servicios (INEGI, 2005). Lo anterior demuestra que la situación es preocupante, no solo por esta deficiente cobertura, sino también porque no existe la infraestructura suficiente, para el tratamiento de aguas residuales antes de su destino final: lagos, ríos y mares. La aplicación de plaguicidas organoclorados ha sido una práctica rutinaria en la agricultura en los últimos 50 años. El uso indiscriminado que se ha dado a estos compuestos, ha producido que en la actualidad se detecten residuos de estos en el ambiente y se asocien con riesgo potencial a la salud pública. Son contaminantes que se encuentran en aguas residuales, que en algunos poblados son utilizadas para zonas de riego (Yarto, 2003).

De acuerdo a lo anterior, la comunidad científica se ha dedicado, en encontrar alternativas tecnológicas que permitan dar solución a la problemática del saneamiento en nuestro país, principalmente para aquellas pequeñas y medianas localidades así como para zonas rurales; para ello, desde hace ya varios años se han enfocado en investigar los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, ya que estos sistemas han demostrado ser excelentes tratamientos para la descontaminación de aguas bajo diferentes condiciones climáticas (Hamer, 2000) y que además, son sistemas naturales que dado a la presencia de plantas y su interacción con los microorganismos asociados a la zona radicular, permiten el sostenimiento de procesos físicos, químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua. Para el tratamiento y reuso de aguas residuales en el poblado de Ocotzá, de la comunidad de Villagrán, municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, se construyó un humedal artificial abastecido por agua residual proveniente de la zona metropolitana de la ciudad de México con el propósito de emplear el agua tratada en actividades productivas agropecuarias.

Con la finalidad de valorar la presencia y concentración de plaguicidas organoclorados se realizaron muestreos, una serie de análisis y estudios de laboratorio que permitieron determinar las condiciones en las que funciona el humedal.



3. MARCO TEÓRICO

3.1. PLAGUICIDAS ORGANOCOLORADOS

En la década de los treinta para combatir plagas como el mosquito *Anopheles labranchiae* vector de la malaria, se introdujeron los plaguicidas organoclorados por su costo y sus efectos letales contra los insectos (Murayama y Moriyama, 2003).

Se caracterizan por poseer uno o varios átomos de cloro en su estructura química, son compuestos poco solubles en agua, poco volátiles, estables a la luz solar, a la humedad, al aire y al calor, lo que los hace bastante persistentes en el medio ambiente (ver anexo II). Su persistencia se debe a su difícil descomposición y fácil integración a los niveles tróficos mediante su absorción por la piel, el tubo digestivo o el aparato respiratorio; también se acumula en el tejido graso (Gitahi, 2002).

Aunque los plaguicidas han sido diseñados para ofrecer una alta especificidad de acción, su empleo genera innumerables efectos indeseables, persistencia ambiental de residuos tóxicos, contaminación del agua, degradación de la flora y fauna. Al aparecer resistencia en la especie a combatir, se requiere el incremento de las cantidades de plaguicida o la sustitución por agentes más agresivos y tóxicos. Los organoclorados son un ejemplo de persistencia ambiental, ya que permanecen en el suelo, sin degradación significativa, hasta 30 años después de haber sido aplicados (Cuadro 1). En el ambiente, tienen mayor probabilidad de interacción con los diversos elementos que conforman los ecosistemas. Si su vida media y su persistencia son mayores a la frecuencia con la que se aplican, los plaguicidas tienden a acumularse tanto en los suelos como en la biota. Esa permanencia favorece la incorporación a la cadena trófica, la acumulación y la biomagnificación (Meneses, 2001).



Cuadro1. Persistencia de Plaguicidas Organoclorados en suelo.

Insecticida	50 % pérdida de toxicidad en número de años	95 % pérdida de toxicidad en número de años
DDT	3 – 10	4 - 30
Aldrin	1 – 4	1 - 6
Clordano	2 – 4	3 - 5
Dieldrin	1 – 7	5 - 25
Endrin	4 – 8	N. D.
Heptacloro	7 – 12	3 - 5
Lindano	2	3 - 10
Toxafeno	10	N. D.

FUENTE: SEMARNAP, 1996.

Si bien es cierto que los productos organoclorados se utilizan cada vez menos a partir de la década de los 80, en México es posible detectar residuos de estos compuestos. La contaminación del agua se produce en forma directa por la aplicación de pesticidas en el regadío (arrozales, forraje), por lavado de envases o equipos y por descarga de remanentes. Es igualmente preocupante el impacto indirecto, producido por los lixiviados (infiltración) de estos productos a los mantos de agua subterránea. El agua contaminada expande el tóxico a la flora y fauna produciendo la muerte de especies y la probable contaminación de los acuíferos (Baird, 2001).

3.2 DEGRADACIÓN DE PLAGUICIDAS ORGANOCLORADOS

Cuando un plaguicida es liberado en el medio ambiente interacciona con los componentes bióticos y abióticos de éste, sufriendo transformaciones en su estructura, capaces de modificar profundamente sus características físico, químicas y su acción biológica (Patrick, 2004).

Generalmente por las características que presentan los plaguicidas organoclorados (ver anexo II), la degradación y los metabolitos generados no necesariamente han de ser



menos tóxicos que la sustancia original pueden ser también de mayor toxicidad. Cuando el producto de degradación resulta menos tóxico que la sustancia original se trata de una inactivación o destoxificación, si por el contrario, el producto de degradación resulta con mayor toxicidad que el original, se trata de una activación.

Las reacciones de degradación son muy variadas (oxidación, reducción, hidrólisis, sustitución, eliminación de grupos funcionales, etc.) pudiendo estar mediadas tanto por agentes orgánicos (principalmente bacterias), como inorgánicos (Mc Murry, 2008)

Ejemplo: las principales biotransformaciones corresponden a hidroxilaciones, deshidrohalogenación y oxidación del carbono. La metabolización tenderá a aumentar la hidrosolubilidad de estos compuestos así el DDT se transforma en el ácido diclorofenilacético. El aldrín por epoxidación da dieldrín de menor toxicidad (Kiflom, 2001)

La degradación en suelos que contienen plantas es muy diferente a la que se produce en aquellas que no las contienen, las exudaciones que producen y los restos de raíces muertas proporcionan energía y nutrientes capaces de sostener una intensa actividad bacteriana provocando una rápida mineralización de los plaguicidas en esta zona de raíces, que además es la zona más aireada del suelo. Por otra parte, existen evidencias de que los compuestos orgánicos se degradan tanto en la zona no saturada como en el agua de los acuíferos pero los mecanismos y cinética de degradación no se conocen en profundidad.

Los compuestos cloroaromáticos son degradados principalmente por bacterias, siendo algunas de ellas capaces de utilizarlos como única fuente de carbono y energía.

Las bacterias presentes degradan tanto los productos orgánicos básicos como proteínas, lípidos, almidón ó celulosa. Producen enzimas, que atacan o digieren múltiples productos, y absorben los nutrientes del medio líquido; cuando el medio es favorable, su población crece muy rápidamente y se transforman fuertes cantidades de nutrientes y otros productos.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de la bacteria *Cupriavidus necator* capaz de degradar y crecer en una amplia variedad de compuestos cloroaromáticos.

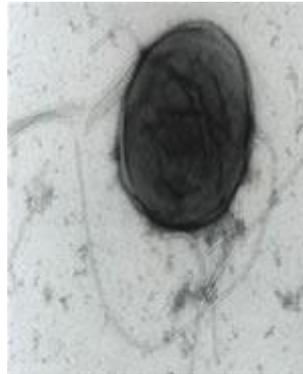


Figura 1. *Cupriavidus necator*

Los organoclorados son moléculas orgánicas con sustituyentes cloro en varios lugares de su estructura, el número y localización de estos sustituyentes determinan la facilidad de degradación del compuesto. Como regla general cuanto más sustituido, menor facilidad de degradación.

La degradación del DDT (diclorodifeniltricloroetano) se muestra en la figura 2 por medio de microorganismos que lo transforman en DDD (diclorodifenildicloroetano) mientras que mamíferos e insectos lo hacen principalmente en DDE (diclorodifenildicloroetileno), en virtud de sus diferentes sistemas enzimáticos. Tanto DDD como DDE son compuestos bastante estables y de larga vida en el medio y además son bastante tóxicos (Mc Murry, 2008).

La cinética de degradación de los plaguicidas se ve afectada por:

- La cantidad de plaguicida y la accesibilidad al sistema que lo va a degradar. Por ejemplo, el plaguicida puede estar absorbido y no ser accesible a los microorganismos del suelo o por el contrario puede estar como emulsión en agua muy fácilmente accesible.
- Presencia de microorganismos o sistemas enzimáticos capaces de degradar los plaguicidas.

- Nivel de actividad de los microorganismos; este a su vez está afectado por condiciones ambientales tales como pH, P, humedad, aireación, etc.
- Condiciones físico-químicas del medio, potencial redox, temperatura, pH, etc.

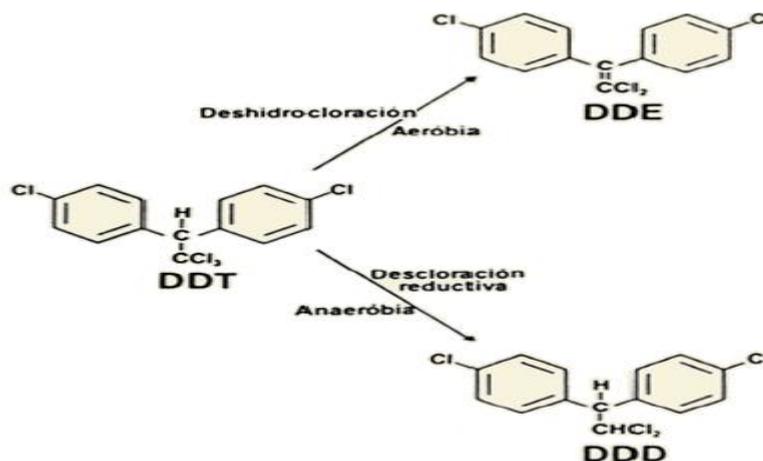


Figura 2. Degradación del DDT

Se conocen tanto los mecanismos como los productos de degradación de la mayoría de los plaguicidas hoy en uso. Sin embargo, desde la perspectiva de calidad del agua, la aparición de metabolitos no es tan importante como la velocidad a la que son producidos. En general, los hidrocarburos clorados causan severos problemas de calidad en las aguas, debido a su lenta velocidad de degradación (Patrick, 2004).

3.3. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua se refiere a la concentración de gases y sólidos disueltos, sólidos en suspensión, iones de hidrógeno, organismos patógenos y calor en una determinada cantidad de agua. Las sustancias químicas representan un problema para la calidad del agua dependiendo de su toxicidad intrínseca, del tiempo que persisten en el líquido sin descomponerse, de su bioacumulación, de la manera como interactúan con otros químicos, de cómo se transportan del suelo y el aire hacia el agua y de su potencial transformación en otras formas químicas más peligrosas (Swackhamer, 2004).



La valoración del agua como buena o mala calidad no es absoluta, depende del uso que se le de o el destino que tenga, por ello, la calidad del agua puede también ser definida simplemente como la aptitud del líquido para sostener varios usos o procesos. Todas las actividades humanas que dependen del agua, tanto consuntivas (agropecuarias, domésticas e industriales) como no consuntivas (recreación, pesca, generación de energía eléctrica, transporte acuático), requieren que la concentración de algunos de los constituyentes que determinan su calidad se encuentren dentro de ciertos límites. Cuando alguno de estos sobrepasa el límite, se afecta su aptitud para determinado uso y se considera un contaminante. A mayores volúmenes extraídos para satisfacer las necesidades de los consumidores, se incrementan también los volúmenes de aguas residuales que vulneran y degradan la calidad de las mismas fuentes de abastecimiento, ya que la mayor parte de los usos afecta la calidad del agua (Jackson et al., 2001).

Los problemas del agua se centran tanto en la calidad como en la cantidad. La comunidad debe conocer la importancia de la calidad de la misma y esa misma comunidad de encargarse de su cuidado y preservación.

La calidad del agua varía continuamente en el tiempo a causa de factores naturales, como los cambios estacionales en la frecuencia e intensidad de las lluvias, así como por la variación temporal en las actividades socioeconómicas que influyen sobre ella. Esto es particularmente cierto en los cuerpos acuáticos en los que hay un aporte de agua, corrientes y recambios continuos. Algunos de los indicadores se presentan en términos de promedios anuales y nacionales o regionales, que pueden diferir significativamente de los valores locales en un momento determinado. Para conocer el comportamiento de la calidad del agua en los cuerpos superficiales, en las zonas costeras y en acuíferos, se llevan acabo mediciones a través de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua (CNA, 2005).

La distribución de la calidad de agua, refleja que más del 60% de los acuíferos contienen agua de buena calidad natural, con concentraciones menores o iguales a $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ de sólidos totales disueltos. En general, la salinidad del agua subterránea es mayor en las zonas áridas, debido a que la precipitación pluvial es escasa y la evaporación potencial es muy alta, lo que propicia la concentración de sales. Por el contrario, en las zonas tropicales y de mayor precipitación, la salinidad natural del agua es menor. A nivel nacional existen



alrededor de 40 acuíferos que presentan cierta degradación de la calidad del agua subterránea por actividades antropogénicas o causas de origen natural (Revenga *et al.*, 2005).

3.4. AGUAS RESIDUALES

La NOM-001-SEMARNAT-1996, define el agua residual como “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas”. Los contaminantes en el agua residual son generalmente una complicada mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos.

El agua residual es el líquido de composición variada proveniente de uso municipal, industrial, agropecuario, o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada, y que por tal motivo ha sufrido degradación o alteración (Metcalf *et al.* 1991).

Las sustancias químicas, que contiene el agua residual, representan un problema para la calidad del agua dependiendo de su toxicidad intrínseca, del tiempo que persisten en el líquido sin descomponerse, de su bioacumulación, de la manera cómo interactúan con otros químicos, de cómo se transportan del suelo y del aire hacia el agua, y de su potencial transformación en otras formas químicas más peligrosas (Swackhamer, 2004).

El tratamiento de aguas residuales es un complemento importante desde el punto de vista ecológico ya que mejora la calidad del agua y resulta más conveniente el intercambio y tratamiento de aguas residuales que continuar pasando el agua de cuenca en cuenca. (Belmont *et al.*, 2004)

De acuerdo con la comisión nacional del agua, en el 2005 se estimó que en México a nivel municipal se generaron 255 m³/s de aguas residuales, de los cuales 205 m³/s se colectaron en la red de drenaje municipal 80.4% y solamente 71.8 m³/s del total generado recibió algún tipo de tratamiento 28.2%.



Por otra parte de las 1433 plantas de tratamiento en operación, el 41.3% utilizaba lagunas de estabilización como sistema de tratamiento y 23.1% utilizaban la tecnología de lodos activados, en ambos casos se requieren grandes superficies de tratamiento, se despiden olores ofensivos y son un foco de infección debido a que constituyen un medio eficiente para la proliferación de mosquitos y otros vectores de enfermedades asociados al agua contaminada. De toda el agua que se trata en México sólo el 25.3% se rehúsa. Estos resultados han llevado a México en el año 2002 a ocupar el lugar número 106 de 122 países en cuanto a la calidad del agua. Por tanto existe una gran tarea por realizar a fin de revertir el proceso de degradación que estamos causando a nuestros ecosistemas acuáticos. (CNA, 2005)

Hoy en día las aguas residuales domésticas que se generan en pequeñas comunidades y en los fraccionamientos se conducen, cuando es posible, al sistema de drenaje municipal, perdiéndose en promedio más de 210 litros/persona/día de esta agua que normalmente va a dar a los ríos sin tratamiento alguno. En donde no existe red sanitaria, normalmente se construyen pozos de absorción que reciben las aguas residuales y las conducen a los mantos freáticos generando con el tiempo un foco potencial de contaminación para los mismos. (Belmont *et al.*, 2004).

3.4.1 COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las características de un agua se pueden clasificar en físicas, químicas y biológicas. Entre las características físicas la más importante es el contenido total de sólidos, que está compuesto por materia flotante, en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. La diferencia entre las tres últimas es una cuestión de tamaño, siendo el de las partículas disueltas menores que el de las partículas coloidales y éstas a su vez de inferior tamaño a las partículas en suspensión. Las principales características químicas son el contenido de materia orgánica (proteínas, hidratos de carbono, grasas animales, aceites fenoles, productos químicos agrícolas, etc.), materia inorgánica (cloruros, hidróxidos, carbonatos,



bicarbonatos, nitratos etc.) y gases (nitrógeno, amoníaco, metano etc.). Las características biológicas básicas son por un lado la existencia de microorganismos patógenos y virus capaces de transmitir enfermedades, y por otro, la ausencia de vida acuática debido a la escasez o carencia de oxígeno disuelto en la masa de agua (Rodier, 1991).

La composición de las aguas residuales se analiza con diversas mediciones físicas, químicas y biológicas. Las mediciones más comunes incluyen la determinación del contenido en sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y el pH.

Los residuos sólidos comprenden los sólidos disueltos y en suspensión. Los sólidos disueltos son productos capaces de atravesar un papel filtro, y los suspendidos los que no pueden hacerlo. Los sólidos en suspensión se dividen a su vez en sedimentables y coloidales, dependiendo del número de miligramos de sólido que se depositan a partir de 1 litro de agua residual en una hora. Todos estos sólidos pueden dividirse en volátiles y fijos, siendo los volátiles, por lo general, productos orgánicos y los fijos materia inorgánica o mineral. Se incluyen en esta clasificación las grandes partículas que flotan, tales como las arcillas, restos de papel, madera en descomposición, partículas de comida y basura.

La concentración de materia orgánica se mide con los análisis DBO y DQO. La DBO es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20 °C. De modo similar, la DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente. La DBO suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas.

La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos.



El pH mide la acidez de una muestra de aguas residuales. Los valores típicos para los residuos sólidos presentes en el agua y la DBO del agua residual doméstica (Metcalf *et al.*, 1991).

No es fácil caracterizar la composición de los residuos industriales con arreglo a un rango típico de valores dado según el proceso de fabricación.

La composición de las infiltraciones depende de la naturaleza de las aguas subterráneas que penetran en la canalización. El agua de lluvia residual contiene concentraciones significativas de bacterias, elementos traza, petróleo y productos químicos orgánicos.

Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales, transmiten muchas de las enfermedades infecciosas se clasifican entre las categorías de bacterias, protozoarios, helmintos y virus. Los más importantes son las bacterias: *Escherichia coli*, *Legionella pneumophila*, *Salmonella sp*; protozoarios como: *Cryptosporidium parvu* (OMS, 2005). Dentro de los nutrientes, el nitrógeno, fósforo y carbono, son esenciales para el desarrollo de las especies vegetales y animales. Cuando son descargados en ambientes acuáticos pueden proliferar organismos no deseados. Por otro lado, cuando la concentración de estos nutrientes es elevada y se descargan en suelos, se podrán ver afectados los mantos acuíferos (Phillips, 2002).

El oxígeno disuelto es uno de los constituyentes que determinan la calidad de los cuerpos de agua. La presencia de este gas en cantidad suficiente es indispensable para la existencia de la vida acuática y la calidad estética de los ríos, lagos y lagunas. La ausencia de oxígeno en el agua crea condiciones sépticas y de mal sabor y olor propias de la putrefacción, que impiden prácticamente cualquier uso de este recurso. Las descargas de materia orgánica en los cuerpos de agua afectan la concentración de este constituyente, ya que los microorganismos que descomponen estos desechos consumen el oxígeno disponible (Ahmad *et al.*, 2002).

La contaminación del agua por fósforo tiene como fuente principal el uso de fertilizantes agrícolas, aunque proviene también de la erosión del suelo y la materia orgánica en



descomposición que descargan industrias, urbes y granjas de animales domésticos. El fósforo tiene la capacidad de fijarse fuertemente al suelo, lo que paradójicamente ha provocado que se aplique en exceso sobre los cultivos, ya que implica pocas pérdidas desde el punto de vista agrícola. No obstante, las pequeñas cantidades de este nutriente

que se transportan con la erosión hídrica y eólica del suelo puede tener severos impactos en la calidad de las fuentes de agua superficiales. (Swackhamer, 2004).

El nitrato es un componente importante de los fertilizantes y puede originarse también de la oxidación del amonio (NH_4) y de otras fuentes presentes en los restos orgánicos. Su presencia en los cuerpos de agua superficiales se asocia tanto con fuentes no puntuales de contaminación (campos de cultivo) como con fuentes puntuales (descarga directa de aguas residuales municipales, industriales en los afluentes o los tiraderos de basura). Los compuestos que le dan origen pueden llegar a los cuerpos de agua por escurrimiento superficial o también depositarse por vía atmosférica en una cantidad significativa. Se cuenta con evidencias sólidas del efecto adverso en la salud humana del agua con elevadas concentraciones de nitrato, particularmente en los infantes menores de 3 meses. Los iones nitrato son reducidos a iones nitrito (NO_2) en el tracto digestivo, los cuales oxidan la hemoglobina a metahemoglobina, incapaz de transportar oxígeno al cuerpo, causando cianosis y hasta asfixia (Swackhamer, 2004).

Dentro de los contaminantes del agua residual se encuentran plaguicidas organoclorados que han sido utilizados para atacar diversas plagas, aumentar y proteger el rendimiento de las cosechas o combatir vectores de enfermedades infecciosas como el paludismo.

No obstante, los plaguicidas organoclorados (con átomos de cloro en su estructura molecular) tienden a persistir por años en los tejidos grasos de los seres vivos. Un buen ejemplo es el Dicloro-Difenil Tricloroetano, mejor conocido como DDT. (Arias, 1990).



3.4.2 DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse mediante procesos físicos, químicos, y/o biológicos. Los procesos físicos eliminan la materia en suspensión por intercepción o por gravedad. Los procesos físico-químicos mejoran los físicos, ya que con la adición de productos químicos se consigue incrementar el rendimiento de eliminación de sólidos en suspensión. Los procesos biológicos se aplican principalmente para la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual tanto en forma coloidal como en disolución. Gracias a la actividad biológica, estas sustancias se convierten en gases que se liberan a la atmósfera, y en tejido celular biológico (microorganismos) eliminables por sedimentación (Ramalho, 1996).

Las aguas residuales atraviesan por una serie de tratamientos para reducir su volumen y toxicidad. Las tres fases del tratamiento son la primaria, la secundaria y la terciaria. En la primaria, se elimina un gran porcentaje de sólidos en suspensión y materia inorgánica. En la secundaria se trata de reducir el contenido en materia orgánica acelerando los procesos biológicos naturales. La terciaria es necesaria cuando el agua va a ser reutilizada; elimina un 99% de los sólidos y además se emplean varios procesos químicos para garantizar que el agua esté tan libre de impurezas como sea posible (Mujeriego, 2000).

3.4.2.1 Tratamiento primario

Las aguas residuales que entran en una depuradora contienen materiales que podrían atascar o dañar las bombas y la maquinaria. Estos materiales se eliminan por medio de enrejados o barras verticales, y se queman o se entierran tras ser recogidos manual o mecánicamente. El agua residual pasa a continuación a través de una trituradora, donde las hojas y otros materiales orgánicos son triturados para facilitar su posterior procesamiento y eliminación.

- **Cámara de arena**

Hoy en día las más usadas son las cámaras aireadas de flujo en espiral con fondo en tolva, o clarificadores, provistos de brazos mecánicos encargados de raspar. Se elimina el



residuo mineral y se vierte en vertederos sanitarios. La acumulación de estos residuos puede ir de los 0.08 a los 0.23 m³ por cada 3.8 millones de litros de aguas residuales.

- **Sedimentación**

Una vez eliminada la fracción mineral sólida, el agua pasa a un depósito de sedimentación donde se depositan los materiales orgánicos, que son retirados para su eliminación. El proceso de sedimentación puede reducir de un 20 a un 40% la DBO y de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión.

La tasa de sedimentación se incrementa en algunas plantas de tratamiento industrial incorporando procesos llamados coagulación y floculación químicas al tanque de sedimentación. La coagulación es un proceso que consiste en añadir productos químicos como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico o polielectrolitos a las aguas residuales; esto altera las características superficiales de los sólidos en suspensión de modo que se adhieren los unos a los otros y precipitan. La floculación provoca la aglutinación de los sólidos en suspensión. Ambos procesos eliminan más del 80% de los sólidos en suspensión.

- **Flotación**

Una alternativa a la sedimentación, utilizada en el tratamiento de algunas aguas residuales, es la flotación, en la que se fuerza la entrada de aire en las mismas, a presiones de entre 1.75 y 3.5 kg por cm². El agua residual, supersaturada de aire, se descarga a continuación en un depósito abierto. En él, la ascensión de las burbujas de aire hace que los sólidos en suspensión suban a la superficie, de donde son retirados. La flotación puede eliminar más de un 75% de los sólidos en suspensión.

- **Digestión**

La digestión es un proceso microbiológico que convierte el lodo, orgánicamente complejo, en metano, dióxido de carbono y un material inofensivo similar al humus. Las reacciones se producen en un tanque cerrado o digestor, y son anaerobias, esto es, se producen en



ausencia de oxígeno. La conversión se produce mediante una serie de reacciones. En primer lugar, la materia sólida se hace soluble por la acción de enzimas. La sustancia resultante fermenta por la acción de un grupo de bacterias productoras de ácidos, que la reducen a ácidos orgánicos sencillos, como el ácido acético. Entonces los ácidos orgánicos son convertidos en metano y dióxido de carbono por bacterias. Se añade lodo espesado y calentado al digester tan frecuentemente como sea posible, donde permanece entre 10 y 30 días hasta que se descompone. La digestión reduce el contenido en materia orgánica entre 45% y un 60%.

- **Desecación**

El lodo digerido se extiende sobre lechos de arena para que se seque al aire. La absorción por la arena y la evaporación son los principales procesos responsables de la desecación. El secado al aire requiere un clima seco y relativamente cálido para que su eficacia sea óptima, y algunas depuradoras tienen una estructura tipo invernadero para proteger los lechos de arena. El lodo desecado se usa sobre todo como acondicionador del suelo; en ocasiones se usa como fertilizante, debido a que contiene un 2% de nitrógeno y un 1% de fósforo (Moshiri, 2000).

3.4.2.2 Tratamiento secundario

Una vez eliminados de un 40 a un 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la cantidad de materia orgánica en el agua. Por lo general, los procesos microbianos empleados son aeróbicos, es decir, los microorganismos actúan en presencia de oxígeno disuelto. El tratamiento secundario supone, de hecho, emplear y acelerar los procesos naturales de eliminación de los residuos. En presencia de oxígeno, las bacterias aeróbicas convierten la materia orgánica en formas estables, como dióxido de carbono, agua, nitratos y fosfatos, así como otros materiales orgánicos. La producción de materia orgánica nueva es un resultado indirecto de los procesos de tratamiento biológico, y debe eliminarse antes de descargar el agua en el cauce receptor (Ramalho, 1996).



Hay diversos procesos alternativos para el tratamiento secundario, incluyendo el filtro de goteo, el lodo activado y las lagunas.

❖ **Filtro de goteo**

En este proceso, una corriente de aguas residuales se distribuye intermitentemente sobre un lecho o columna de algún medio poroso revestido con una película gelatinosa de microorganismos que actúan como agentes destructores. La materia orgánica de la corriente de agua residual es absorbida por la película microbiana y transformada en dióxido de carbono y agua. El proceso de goteo, cuando va precedido de sedimentación, puede reducir cerca de un 85% la DBO.

❖ **Fango activado**

Se trata de un proceso aeróbico en el que partículas gelatinosas de lodo quedan suspendidas en un tanque de aireación y reciben oxígeno.

Las partículas de lodo activado, están compuestas por millones de bacterias en crecimiento activo aglutinadas por una sustancia gelatinosa. Absorbe la materia orgánica y la convierte en productos aeróbicos. La reducción de la DBO fluctúa entre el 60% y el 85%.

Un importante acompañante en toda planta que use lodo activado o un filtro de goteo es el clarificador secundario, que elimina las bacterias del agua antes de su descarga.

❖ **Estanque de estabilización o laguna**

Otra forma de tratamiento biológico es el estanque de estabilización o laguna, que requiere una extensión de terreno considerable y, por tanto, suelen construirse en zonas rurales. Las lagunas opcionales, que funcionan en condiciones mixtas, son las más comunes, con una profundidad de 0.6 a 1.5 m y una extensión superior a una hectárea.

En la zona del fondo, donde se descomponen los sólidos, las condiciones son anaerobias; la zona próxima a la superficie es aeróbica, permitiendo la oxidación de la materia orgánica disuelta y coloidal. Puede lograrse una reducción de la DBO de 75% a 85%.



Mediante la combinación de estos procesos se pueden diseñar diferentes líneas de tratamiento que se ajustaran a los condicionantes existentes características del agua a tratar, condicionantes climáticos, disponibilidad de espacio y condicionantes legales, sociales y económicos (Revenge *et al.*, 2005).

3.4.2.2 Tratamiento terciario

De carácter físico, químico o biológico: desde el punto de vista conceptual no aplica técnicas diferentes que los tratamientos primarios o secundarios, sino que utiliza técnicas de ambos tipos destinadas a pulir o afinar el vertido final, mejorando alguna de sus características. Si se emplea intensivamente pueden lograr hacer el agua de nuevo apta para el abastecimiento de necesidades agrícolas, industriales, e incluso para potabilización.

3.5. HUMEDALES

Los humedales naturales son áreas que quedan inundadas periódicamente y donde la profundidad es suficiente para que vivan las plantas propias de los suelos naturales, generalmente son áreas de transición entre los sistemas acuáticos y los terrestres.

En los últimos años se han reconocido las múltiples funciones y valores de los humedales naturales. Estos sistemas debido a la gran cantidad de luz, agua y nutrientes, juntamente con la presencia de plantas que han desarrollado adaptaciones morfológicas y bioquímicas se encuentran entre los sistemas más productivos del mundo.

Estos sistemas dan como resultado una alta productividad microbiana y una alta capacidad de descomponer materia.

Todo esto, juntamente con los resultados de la capacidad asimilativa obtenidos en experiencias realizadas con vertidos controlados de aguas residuales en los humedales naturales, ha conducido a la construcción de humedales artificiales para utilizarlos en el tratamiento de aguas residuales (Moshiri, 2000).



Los humedales naturales son complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, flotante y emergente así como zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, en los que el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo periodo de tiempo cada año. En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales.

Estos seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos químicos tan tóxicos como los plaguicidas organoclorados (Mitsch y Gosselink, 2000).

Las interacciones de los componentes físicos, biológicos y químicos de un humedal, como los suelos, el agua, las plantas y los animales, hacen posible que el humedal desempeñe muchas funciones vitales como por ejemplo: almacenamiento de agua; protección contra tormentas y mitigación de inundaciones; estabilización del litoral y control de la erosión; recarga de acuíferos (aguas subterráneas); purificación de aguas mediante retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes; y estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente la precipitación y la temperatura. Pese a los valores y funciones que los humedales representan, figuran entre los ecosistemas más amenazados de la tierra, a causa de su continua desecación, conversión y contaminación, así como a la explotación excesiva de sus recursos (Ramsar, 2006).

La creciente sensibilidad social respecto a la protección del medio ambiente considera que la gestión de los residuos y del agua residual como tal, se convierta en un hecho decisivo en el camino hacia la sostenibilidad y por ello se fomenta la creación y el estudio de nuevas tecnologías para conseguir aportar al medio ambiente el agua residual en inmejorables condiciones sanitario-ambientales (García *et al.*, 1997).

Las estaciones depuradoras de tipo natural formadas por humedales construidos de flujo superficial constituyen un eficaz procedimiento de depuración de las aguas residuales, y a pesar de su corto periodo de experiencia se han convertido en una alternativa atractiva para el tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos de población.



La depuración se consigue mediante la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos en el interior del medio granular plantado que constituye el humedal (Elida, 2001).

La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat. Se ha tratado de aprovechar este gran potencial depurador de los humedales para el tratamiento de aguas residuales, diseñando instalaciones capaces de reproducir las características de los humedales naturales. Los humedales específicamente construidos con el propósito de controlar la contaminación del agua han recibido gran cantidad de nombres en las distintas partes del mundo donde han sido usados (Crites y Tchobanoglous, 2000). La denominación más extendida es “Humedales Artificiales” o “Humedales Construidos” (EPA, 2003).

Los humedales construidos son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (normalmente de menos de 1m.) plantados con plantas propias de zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. Se ha tratado de aprovechar este gran potencial depurador de los humedales para el tratamiento de aguas residuales diseñando instalaciones capaces de reproducir las características de los humedales naturales (EPA, 2003).

En los sistemas naturales la velocidad de depuración tiene lugar al ritmo de crecimiento natural de microorganismos, vegetación y fauna. Esto es debido a que funcionan con energía natural ambiental y por tanto no requieren de energía externa. Puesto que no requieren de energía externa necesitan más superficie para alcanzar el mismo grado de depuración que los sistemas convencionales por lo que su principal aplicación en nuestro país es en pequeños núcleos rurales donde se dispone de terreno suficiente para su ubicación. El coste de mantenimiento requerido es menor que el de sistemas convencionales. Estos sistemas nos otorgan la oportunidad de crear verdaderos ecosistemas a su alrededor (Rosales, 2011).

3.5.1. CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los humedales construidos se definen como los sistemas que han estado especialmente diseñados para el tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento mediante humedales construidos se ha generalizado en Europa, América del norte y Australia desde la mitad de los 80. Los primeros sistemas se pusieron en funcionamiento en los años 68-70 y en este momento hay más de 10000 sistemas funcionando en todo el mundo (Arias, 1998).

Según la forma como circula el agua los humedales construidos se clasifican en humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial. En los humedales de flujo superficial (en inglés *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos.

La figura 3 muestra este tipo de humedales que se pueden entender como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad (no más de 0.4 m) y con plantas (EPA, 2003).

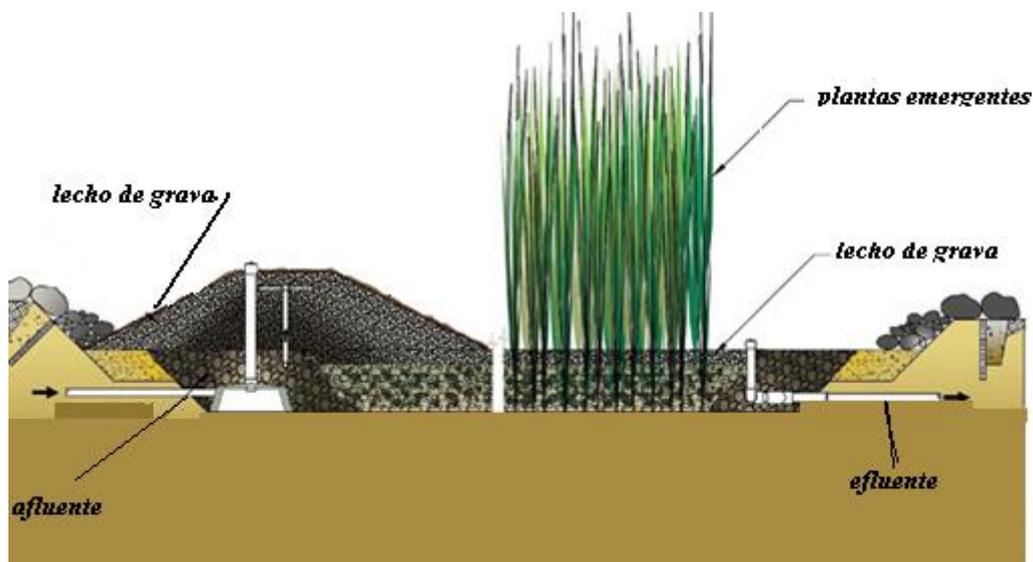


Figura 3. Humedal de flujo superficial
FUENTE: EPA, 2003



Existen algunas ventajas de los humedales construidos de flujo subsuperficial respecto los de flujo superficial: control de olores y de vectores, aislamiento térmico y una mayor cantidad de biopelícula ya que el material de relleno proporciona mayor superficie específica.

En los humedales de flujo subsuperficial (en inglés subsurface flow constructed wetlands) la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular (con una profundidad de la lámina de agua de alrededor de 0,6 m) y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos. Este tipo de humedales se podrían entender como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. La figura 4 muestra un humedal de flujo subsuperficial formando parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno (como los filtros verdes y los sistemas de infiltración-percolación), mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua como los lagunajes (EPA, 2003)

Los Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial son sistemas utilizados como tratamiento secundario o terciario. Están precedidos por algún tratamiento físico simple que tiene como finalidad eliminar las partículas de mayor grosor y evitar obstrucciones de la zona de entrada en los humedales.

Este tratamiento físico inicial reduce en parte la concentración de materia orgánica e incrementa los costes de construcción y el de mantenimiento posterior de la planta una vez que ha sido construida. Normalmente este tratamiento inicial está constituido por una reja de desbaste y un decantador primario; aunque podemos encontrar sistemas de depuración más complejos donde este tratamiento previo sea un sistema de lagunaje.

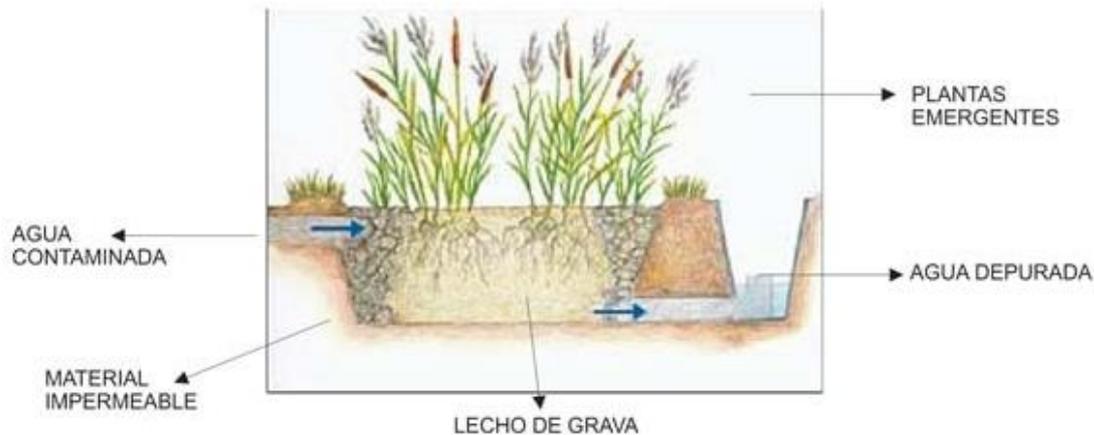


Figura 4. Humedal construido de tipo flujo subsuperficial
FUENTE: Mejía, 2002

Los humedales construidos son sistemas de depuración naturales que se caracterizan por: su simplicidad de operación, un bajo o nulo consumo energético, una baja producción de residuos, un bajo impacto ambiental sonoro y una buena integración al medio ambiente rural (ver anexo I). Se han utilizado para tratar una gama amplia de aguas residuales (Mejía- Saénz *et al.*, 2002).

La depuración del agua se consigue con la eficiente combinación de diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en el interior del medio granular plantado.

Estos sistemas consisten normalmente en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos. El efluente, normalmente después de recibir un tratamiento primario, pasa a través del humedal durante un tiempo adecuado (tiempo de retención), donde es tratado a través de varios procesos físicos, químicos y bacteriológicos (Brix, 1994).

El oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica 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 estas plantas acuáticas favorece también el crecimiento de bacterias nitrificantes. Por estar el agua en continuo movimiento no se producen malos olores ni se generan lodos en cuantía apreciable, ya que son autoasimilados por el propio sistema (Stepniewski, 2000).



Con este sistema de tratamiento se obtiene una buena calidad del flujo de agua depurada; aunque los mecanismos de depuración que se dan en el interior del humedal no se conocen todavía muy bien. Durante los últimos 20 años en diversos estudios que se han llevado a cabo se intenta conocer el funcionamiento de estos humedales, así como estimar y cuantificar las vías de degradación que se producen y acabar las interpretaciones que se realizaron a este tipo de instalaciones (Belmont *et al.*, 2004).

3.5.2. COMPONENTES DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS

3.5.2.1 Estructuras de distribución de aguas residuales

Las estructuras de distribución y vertido son dispositivos que permiten el control adecuado de las aguas afluentes. Sus funciones son la captación, la separación y la repartición del agua afluente al humedal. El agua residual recogida por una o varias arquetas que mediante vertederos distribuyen el caudal para conducirlo a la cabecera de los lechos del humedal. El vertido del agua residual sobre el medio granular normalmente no se produce de forma directa sino que existe una pequeña zona rellena con una grava de gran tamaño para evitar la acumulación de agua en superficie y que permite una distribución homogénea en profundidad (Metcalf, 1991).

3.5.2.2 Sustrato

La principal característica del sustrato es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua. Utiliza mecanismos directos e indirectos para la eliminación de agentes contaminantes del agua residual que circula por su interior. Es el responsable directo de algunas formas de extracción de sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. Para esta extracción la distribución del tamaño de partículas tiene un papel importante: la fracción fina de los limos tiene mucha capacidad de asimilar contaminantes y la fracción arenosa tiene una gran capacidad percoladora pero no elimina contaminantes, ya que estos humedales a grandes rasgos funcionan como filtros horizontales de grava.



De forma indirecta el sustrato también contribuye a la eliminación de contaminantes, ya que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas (otra característica que deben cumplir los suelos utilizados como medio es que han de permitir el crecimiento de las plantas. Las plantas utilizadas deben ser especies que tienen la capacidad de crecer en gran variedad de suelos y que su superficie específica sirva para el desarrollo de colonias de microorganismos que llevaran a cabo la actividad biodegradadora (tratamiento biológico) de la materia orgánica tan relevante en este tipo de sistemas (Ahmad *et al.*, 2002).

3.5.2.3. Vegetación

El papel de las plantas en los sistemas de humedales construidos viene determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados (figura 5). Se trata de organismos fotoautótrofos, que recogen la energía solar para transformar el carbono inorgánico de la atmósfera en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de las hojas y tallo hasta el medio donde se encuentran las raíces. La mayoría de este oxígeno es usado por la raíz de la planta y su disponibilidad es limitada para la actividad microbiana. Pero parte de este oxígeno puede crear microambientes aerobios-anaerobios y se pueden producir reacciones aerobias de degradación de materia orgánica y nitrificación.

Los efectos que se producen gracias a la presencia de plantas además del valor estético y el aprovechamiento del espacio para el hábitat de la fauna autóctona son:

- a) Efectos físicos: estabilizan el medio granular y amortiguan las variaciones de los parámetros ambientales como por ejemplo la velocidad del viento, la intensidad de luz incidente en el lecho y la temperatura.
- b) Efectos sobre la conductividad hidráulica: la muerte de raíces y rizomas dejan huecos en forma de pequeños tubos que permiten un cierto incremento y estabilización de la conductividad hidráulica del suelo.

- c) Superficie para el crecimiento de microorganismos: las raíces y rizomas representan un soporte físico sobre el que crecen bacterias, hongos y protozoarios.
- d) Asimilación de nutrientes: las plantas para su desarrollo requieren nutrientes que obtienen principalmente a través de su sistema radicular. No obstante las
- e) cantidades de nutrientes asimiladas son insignificativas en comparación con las cargas de nutrientes del agua residual y además, si las partes aéreas de las plantas no se siegan periódicamente los nutrientes asimilados vuelven al agua por los procesos de descomposición.
- f) Aporte de oxígeno: los rizomas liberan oxígeno que influye en las reacciones bioquímicas estimulando la descomposición aeróbica de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes (Brix, 1994).

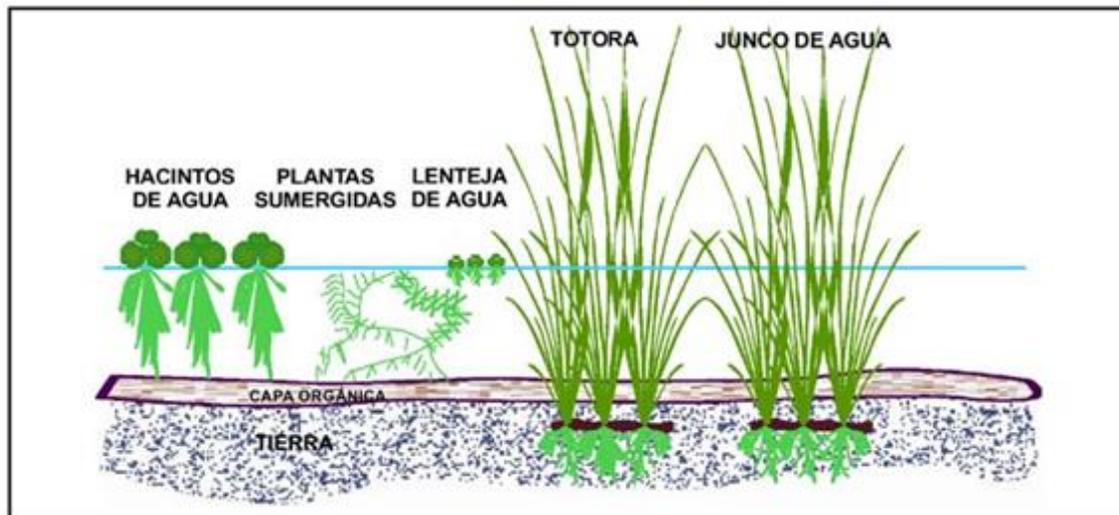


Figura 5. Vegetación empleada en humedales construidos.
FUENTE: Tchobanoglous, 2002

3.5.2.4 Microorganismos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal donde predomina la presencia del oxígeno liberado por las raíces de las plantas y del oxígeno llegado por difusión atmosférica, se desarrollan colonias de



microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predomina la presencia de organismos anaerobios y anóxicos. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y la desinfección (Arias, 1998).

3.5.3. MECANISMOS DE DEPURACIÓN QUE ACTÚAN EN LOS HUMEDALES

Uno de los mecanismos de eliminación de contaminantes en los humedales construidos es la asimilación de nutrientes por las plantas. Este mecanismo, no obstante, no es el más importante. Existen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos que participan en esta eliminación: filtración, degradación aerobia y anaerobia, nitrificación y desnitrificación, asimilación por las plantas y adsorción por la matriz (Tanner, 2001).

A continuación se citan los principales constituyentes del agua residual y sus principales mecanismos de eliminación.

Eliminación de sólidos en suspensión: Los sólidos se eliminan por sedimentación, decantación, filtración y degradación a través del conjunto que forma el sustrato del humedal con las raíces y rizomas de las plantas.

Eliminación de materia orgánica: La eliminación del agua es realizada por los microorganismos que viven adheridos al sistema radicular de las plantas y que reciben el oxígeno a través del sistema de aireación muy especializado comentado anteriormente. Una parte de la aireación del agua también se realiza por difusión del oxígeno del aire a través de la superficie del agua. También se elimina una parte de la materia orgánica por sedimentación (Chico, 2002).

Eliminación de nitrógeno: El nitrógeno se elimina por diversos procesos: absorción directa por las plantas y, en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias.



Eliminación de fósforo: El fósforo se elimina por absorción por las plantas, adsorción sobre las partículas de arcilla y precipitación de fosfatos insolubles, principalmente con Al y Fe, en suelos ácidos y con calcio en suelos básicos.

Eliminación de microorganismos patógenos: Por filtración y adsorción en partículas de arcilla, acción predatoria de otros organismos (bacteriófagos, hongos y protozoarios), toxicidad por antibióticos producidos por las raíces y por la radiación UV contenida en las radiaciones solares.

Metano: Los humedales son una fuente importante y una reserva potencial de metano, pero los factores que controlan su producción y emisión en estos ambientes no se comprenden por completo. Los estudios han demostrado que parámetros como la profundidad del agua, la temperatura y el pH tienen mucha importancia tanto en la producción como en la emisión de metano, pero el estudio únicamente de estos parámetros no puede explicar las variaciones en la producción de metano en diferentes humedales (Amaral y Knowles, 1994).

Sulfato: Los organismos vivos pueden reducir el sulfato a sulfhídrico según dos vías distintas: la asimilativa y la desasimilativa. La primera es utilizada por varios tipos de organismos para la síntesis de compuestos orgánicos de azufre. La segunda es respiratoria y específica para las bacterias sulfato-reductoras. Estas bacterias, anaerobias estrictas, utilizan como aceptor de electrones el sulfato u otros compuestos oxidados del azufre que se reducen a sulfhídrico, producto final de su respiración anaerobia (Hidalgo, 2001).

pH: Las sustancias orgánicas generadas dentro del humedal durante el ciclo de crecimiento, muerte y descomposición son una fuente natural de acidez. Estas sustancias ácidas normalmente tienen una solubilidad baja en condiciones de pH inferior a 7 por lo que precipitan. Cuando estas condiciones cambian a básicas estas sustancias se disuelven en el agua amortiguando el cambio de pH (Kadlec *et al.*, 2000).



Metales traza: Tienen una alta afinidad por adsorción y complejación con materia orgánica y pueden ser acumulados en los humedales. También existen transformaciones microbianas y asimilación por las plantas.

El interés en los humedales construidos, se ha debido a su bajo costo en términos de operación, mínimo o nulo requerimientos de energía e insumos químicos, además de los altos niveles de eficiencia reportados al tratar un rango extenso de contaminantes, incluyendo plaguicidas organoclorados y metales pesados. (Phillips, 2002). (Romero, 1999).

3.6. MÉTODOS BIOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

3.6.1. RESTAURACIÓN

También se le conoce con el nombre de "medidas biocorrectivas". Consiste en el uso de microorganismos para degradar sustancias tóxicas, de ser posible, convirtiéndolas en bióxido de carbono, agua y sales minerales inocuas (Harvey *et al.* 2002).

Los microorganismos normalmente utilizan los compuestos orgánicos tóxicos como fuente de carbono, aunque existen procesos basados en la degradación sintrófica de los tóxicos es decir, el microorganismo no utiliza el compuesto tóxico ni como fuente de carbono ni como fuente de energía, sino que obtiene ambos a partir de otras sustancias. En el caso del sintrofismo, la degradación no reporta un beneficio aparente para el microorganismo y es el producto de reacciones catalizadas por enzimas que tienen otros usos en el organismo. La bio restauración se usa para la eliminación de tóxicos en suelo y agua (Miya, 2001).

3.6.2. REMEDIACIÓN

La remediación se refiere a la transformación química de los contaminantes mediante el uso de microorganismos que satisfacen sus requerimientos nutrimentales y de energía

contribuyendo a la desintoxicación del ambiente por mineralización o co-metabolismo (USEPA 1996). La remediación es la adición de materiales exógenos a los ambientes contaminados para acelerar el proceso natural de biodegradación (Senan y Abraham 2004).

En los procesos de remediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos derivados de petróleo o sintéticos (Senan y Abraham 2004).

Básicamente, los procesos de remediación pueden ser de tres tipos:

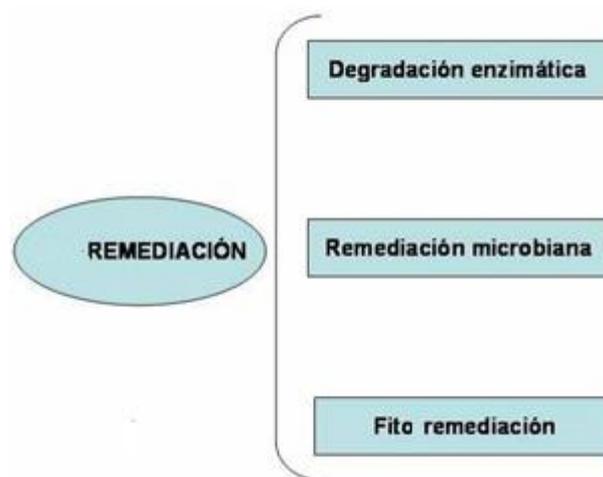


Figura 6. Tipos de remediación
FUENTE: Dushenkov 2003

3.6.2.1 Degradación enzimática

Este tipo de degradación consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas se obtienen en cantidades industriales por bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas.

Estas enzimas son utilizadas en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales (Miya, 2001).

3.6.2.2 Remediación microbiana

En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en remediación pueden ser los ya existentes (autóctonos) en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados.

La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas. Existen, por ejemplo, bacterias y hongos que pueden degradar con relativa facilidad petróleo y sus derivados, benceno, tolueno, acetona, pesticidas, herbicidas, éteres, alcoholes simples, entre otros.

Los metales pesados como uranio, cadmio y mercurio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera de aislarlos para que sean eliminados más fácilmente. En la figura 7 se representa como actúan los microorganismos cuando ingieren contaminantes como fuente de carbono y algunos nutrientes como fósforo y nitrógeno. La digestión de estos compuestos en sustancias más simples como parte del metabolismo del microorganismo, puede resultar en la degradación del compuesto en forma parcial (transformación) o total a dióxido de carbono y agua (Telysheva *et al.* 2002).

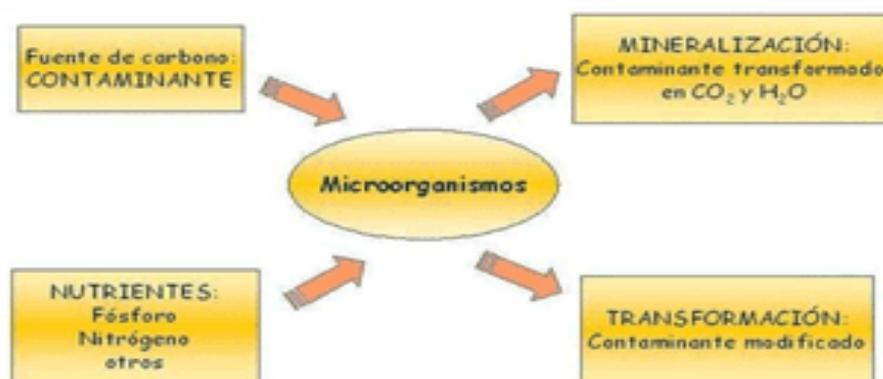


Figura 7. Metabolismo microbiano
FUENTE: Dushenkov 2003

3.6.2.3 Fitorremediación

La fitorremediación es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados. Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos. Se define como el conjunto de métodos para degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados por medio de la utilización de plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para absorber, retener, degradar o transformar dichas sustancias a formas menos tóxicas.

En la Figura 8 se representan los distintos procesos en que las plantas pueden incorporar sustancias contaminantes (Ellen, 1997)

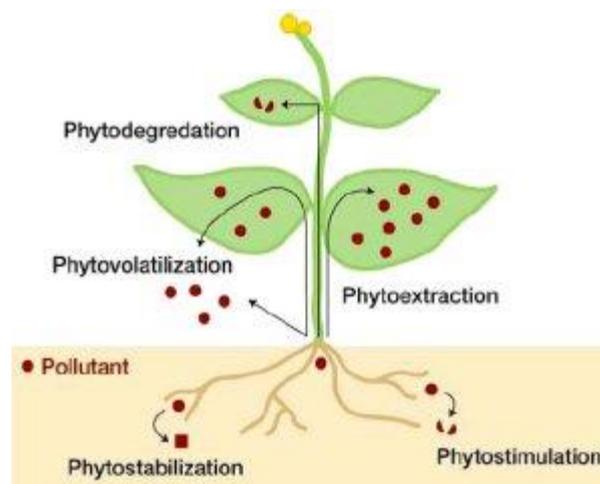


Figura 8. Tipos de fitorremediación, donde se muestra el proceso que ocurre en la planta.

La desintoxicación de contaminantes por fitorremediación se realiza empleando al menos uno de los siguientes mecanismos: fitoextracción, rizofiltración, fitoestimulación, fitoestabilización, fitovolatilización y fitodegradación.



- **Fitoextracción ò fitoacumulación.**

Consiste en la absorción ó extracción de los contaminantes por las raíces, posteriormente se translocan hacia otras partes de la planta donde son acumulados en el tejido de la planta; raíces, tallos ó follaje.

Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en plantas que acumulan metales (Jian *et al.*, 1997) y recientemente con materiales radioactivos (Dushenkov, 2003).

- **Fitovolatilización.**

Se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con los contaminantes orgánicos solubles. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse a la atmósfera. (Núñez *et al.*, 2004). La toma y transpiración de contaminantes del suelo a la atmosfera son liberados y degradados. También puede ser acumulado en hojas ó en frutos e ingresar a la cadena alimenticia (Joner y Leyval, 2003)

- **Fitodegradación ó fitotransformación**

Es un proceso por medio del cual las plantas degradan compuestos orgánicos. Los compuestos son absorbidos y metabolizados. Muy frecuentemente los metabolitos que producen tienen actividad de fitohormonas (aceleran el crecimiento de las plantas). Se han encontrado plantas que degradan residuos de explosivos, disolventes clorados, herbicidas, etc.

Incluye, tanto las transformaciones de contaminantes por procesos metabólicos que se desarrolla en el interior de las plantas, como su transformación en el exterior de las mismas con la participación de los enzimas (Kassel *et al.*, 2002),

○ Fitoestabilización

Es un mecanismo que utiliza la planta para desarrollar un sistema denso de raíces que le permite reducir la biodisponibilidad y la movilidad de los contaminantes evitando el transporte a capas subterráneas o a la atmósfera (Dec y Bollang, 1994)

Implica la inmovilización del contaminante a través de mecanismos como:

- Absorción y acumulación en las raíces.
- Adsorción sobre las raíces.
- Precipitación en la rizosfera.

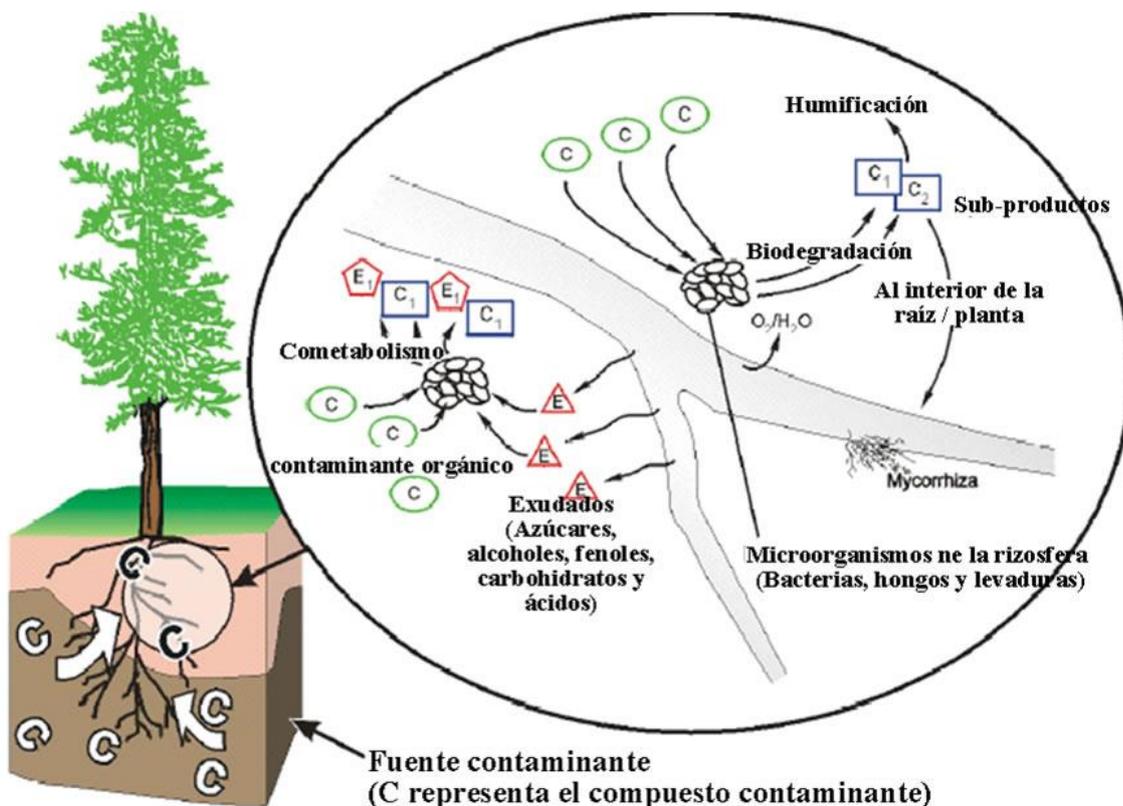


Figura 9. Esquema de rizodegradación
Fuente: EPA,2000

- **Rizodegradación.**

Consiste en la transformación de los contaminantes orgánicos a través de la actividad microbiana favorecida por la presencia de los exudados radiculares (figura 9), entre los que se puede citar: azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroides, factores de crecimiento, nucleótidos, enzimas y flavonoides; que estimulan el crecimiento de los microorganismos nativos capaces de degradar compuestos orgánicos xenobióticos (Pivetz *et al.*, 1997).

- **Rizofiltración.**

Consiste en la adsorción, precipitación sobre las raíces, o absorción en el interior de éstas de los contaminantes presentes a través de procesos bióticos o abióticos.

La rizofiltración se basa en la utilización de plantas crecidas en cultivos hidropónicos, se prefieren raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar contaminantes (Miya, 2001).

Cuadro 2. Tipos de fitorremediación.

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación tratada	Plantas empleadas
Fitoextracción	Las plantas extraen contaminantes por las raíces para translocarlas hacia otras partes de la planta.	Cadmio, Cobalto, Cromo, Níquel, Mercurio, Plomo Selenio y Zinc	Alfalfa, álamo, diente de león, bermuda, <i>Berkheya coddii</i> , <i>Thlaspi caerulescens</i> , <i>Thlaspi arvense</i> , sorgo y enebro
Fitoestabilización	Las plantas reducen la movilidad de los contaminantes.	DDT, Dioxinas, furanos, Dieldrin, Pentaclorofenol, Cadmio, Cromo, Plomo y Zinc.	Freatrófitos que respiran grandes cantidades de agua, pastos con raíces fibrosas y <i>Brassica Juncea</i> ,
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno,	Bacterias y Hongos.



	microorganismos degradativos.	atrazina, etc	
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados ó compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera a través de la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).	Álamo (<i>Populus deltoides</i>)
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos.	Álamo spp, sauce, césped, bermuda, sorgo, cañuela spp, alfalfa trébol y garbanzo spp.
Rizofiltración	Se emplean las raíces de las plantas para absorber, precipitar y concentrar contaminantes a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Isótopos radioactivos, Compuestos fenólicos, Cadmio, Cobalto, Cromo, Níquel, Mercurio, Plomo Selenio, Zinc, Dioxina, furano, Dieldrin y DDT.	Girasol, <i>Menta spicata</i> , <i>Medicago sativa</i> , plantas acuáticas emergentes y sumergidas.

La fitorremediación ocupa un lugar importante porque es una tecnología emergente basada en la acción combinada de plantas (terrestres o acuáticas) con comunidades microbianas nativas sin embargo tiene algunas limitaciones ver anexo (Wetzel *et al.* 1997).

4. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo se llevó a cabo en la Exhacienda de Ocotzá, que forma parte de la localidad de Julián Villagrán perteneciente al municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo. Tiene las siguientes coordenadas geográficas, 20° 29' latitud norte, 99° 13' latitud oeste y se encuentra ubicado a 1,700 metros sobre el nivel del mar.



Figura 10. Ubicación geográfica de Ixmiquilpan, Hidalgo
FUENTE: <http://www.travelbymexico.com/estados/hidalgo>

Extensión: El municipio cuenta con una superficie de 565.3 kilómetros cuadrados, el cual representa el 2.7% de la superficie del Estado.

Orografía: Se encuentra localizado en el eje neovolcánico en un 70%, formado por llanuras y en menor proporción por lomeríos, el otro 30% se localiza en la Sierra Madre Oriental formada por sierra. Dentro de sus elevaciones principales se encuentran los cerros la Palma, Thito, la Muñeca, Xintza, Guadril, Temboo, Dexitzo (la Cruz) y Daxhie.

Hidrografía: En lo que respecta a la hidrología se encuentra posicionado en la región del Pánuco, en la cuenca del río Moctezuma, de la cual se derivan las subcuencas; del río Moctezuma, en la cual, el río Tula, río Actopan y el río Amajac, cubren 2.90%, 55.25%, 29.43% y 12.42% respectivamente.



Clima: Presenta un clima semiseco semicálido. La temperatura promedio para los meses de diciembre y enero que son los más fríos del año oscila entre los 14.5°C y durante los meses de mayo y junio que son las temperaturas más altas registra un promedio de 21.4°C.

La estación meteorológica de la ciudad de Ixmiquilpan tras 53 años de observación a estimado que la temperatura anual promedio en el municipio es de aproximadamente 18.5°C.

Con respecto a la precipitación anual, el nivel promedio observado es de alrededor de 363.8 mm. Según datos observados desde hace más de 50 años, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor precipitación y los de febrero y diciembre los de menor.

Flora: Dentro de sus recursos naturales tiene pino, encino, sabino, pirú, mezquite, jacaranda y oyamel, así como árboles exóticos; aguacate, durazno, granada e higo, en su zona de bosque existe encino prieto, encino manzanilla y como matorral el garambullo, palmas, cactáceas y nopal.

Fauna: La fauna perteneciente a éste municipio está compuesta de tejón, ardilla, tlacuache, onza, conejo, zorro, zorrillo, liebres, ratón de campo, serpientes y una gran variedad de insectos y reptiles.

Clasificación y uso del suelo: De acuerdo a la superficie que se utiliza para cada actividad su orden es el siguiente: pecuario en un 40%, 30% agrícola en donde cultiva maíz, frijol, alfalfa, diversas hortalizas y tomate rojo o jitomate entre otros; seguido por otros usos y finalmente el forestal (INEGI, 2005).



5. JUSTIFICACIÓN

La contaminación de las aguas es un problema que está adquiriendo gran trascendencia debido al notable crecimiento de contaminantes, en los últimos años. Muchas veces la manipulación de estos productos no se realiza como lo establece la legislación, no se respetan las dosis recomendadas y se eligen, sin necesidad, las sustancias más agresivas.

La obtención de agua dulce se evidencia como uno de los problemas ambientales más importantes de los próximos años; dado que la existencia de agua limpia está relacionada con el mantenimiento de ecosistemas sanos, la conservación y el uso sustentable de los humedales se vuelve una necesidad impostergable.

En el caso del valle del mezquital, la introducción de aguas residuales ha provocado un impacto ecológico por lo que fue necesario buscar alternativas con el fin de mejorar las condiciones ecológicas, económicas y sociales de la región.

Como alternativa, en el poblado de Julián Villagrán se construyó un humedal para el rescate ecológico de la región por su capacidad natural de remover contaminantes pero es necesario realizar estudios del agua para poder determinar la calidad del agua.

6. HIPÓTESIS

Si en la bibliografía se ha reportado que los humedales artificiales tienen una eficiencia de hasta 90% para remover sustancias tóxicas como lo son los plaguicidas organoclorados entonces se esperaría que el nivel de contaminación por plaguicidas al menos no rebasen los límites permisibles de plaguicidas organoclorados según los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) propuestos por SEDUE.



7. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los niveles de concentración y distribución de los plaguicidas organoclorados presentes en un humedal construido en la Exhacienda de Ocotzá. Estado de Hidalgo.

Objetivos particulares

- Extraer, purificar y concentrar de acuerdo a los métodos de EPA-600/880-038, 1989 y de NOM-AA-71-1981 los plaguicidas organoclorados (Lindano, Heptacloro, Aldrín, Heptacloro epóxido, Endosulfán, Dieldrín, DDT, Metoxicloro) de las muestras de agua del humedal construido.
- Determinar la concentración de plaguicidas organoclorados en muestras de agua, extraída según el método 508 propuesto por EPA (EPA, 2005) y la NOM-AA-71-1981.
- Evaluar la calidad del agua comparando las concentraciones obtenidas en las muestras con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81 y establecer la zona del humedal que se encuentra más contaminado por plaguicidas organoclorados.



8. MÉTODO

El trabajo realizado se dividió en tres etapas: campo, laboratorio y gabinete.

Las siguientes normas, fueron utilizadas en cada etapa del método para el desarrollo del mismo tanto en campo como en el análisis en laboratorio:

Cuadro 3. Normas y criterios utilizados para el estudio de plaguicidas organoclorados.

OPERACIÓN	NORMA
Tratamiento para el material de cristalería.	Environmental Protection Agency (EPA-600/8-80-038) y US EPA Method (508, 1989).
Toma de la muestra	NOM-AA-14-1980 y NOM-AA-003-1980
Conservación de las muestras	NOM-AA-71-1981
Extracción	US EPA-Method-508,1989 y NOM-AA-71-1981
Purificación	US EPA-Method-508 y NOM-AA-71-1981
Concentración	US EPA-Method-508 y NOM-AA-71-1981
Cromatografía de gases	US EPA Method 508, 1995 y NOM-AA-71-1981
Calidad del agua	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) SEDUE.

Etapas de campo

Para ésta fase, en el humedal construido se ubicaron nueve puntos de muestreo durante los meses de trabajo (abril a octubre de 2005).

El sitio de muestreo corresponde a:

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Muestra 1- Entrada de agua. | Muestra 6- Estanque II. |
| Muestra 2- Sedimentador. | Muestra 7- Estanque III. |
| Muestra 3- Entrada del humedal. | Muestra 8- Estanque IV. |
| Muestra 4- Salida del humedal. | Muestra 9- Estanque V. |
| Muestra 5- Estanque I. | |



Etapas de laboratorio

- ❖ El material de vidrio utilizado en el análisis se lavó con agua caliente y jabón biodegradable y de igual manera enjuagando con agua destilada. Posteriormente se secó el material en horno a 105°C, excepto el material volumétrico.
- ❖ Para una extracción más eficiente la muestra de agua se dividió en dos partes, cada una de las cuales se procesó de la siguiente manera: en un embudo de separación Pyrex se realizaron cuatro extracciones con hexano grado plaguicida J. T. Baker, cada una de 25 mL, por cada 500 mL de muestra. Se separó la fase orgánica de la acuosa eliminando esta última y la fase orgánica se colocó en un matraz Erlen Meyer de 250mL sobre sulfato de sodio anhidro.
- ❖ La fase orgánica de cada muestra fue purificada en columna cromatográfica empacada de manera individual, con lana de vidrio, florisil activado J.T Baker y sulfato de sodio anhidro J.T. Baker. Así mismo, cada eluato se recibió en un matraz balón de fondo plano y junta esmerilada 24/40 con capacidad para 250 mL.
- ❖ Se evaporó el disolvente en un rotavapor marca Heidolph WB2000, (complementado con un dispositivo de trampa para vacío y recirculador de agua) y se resuspendió cada muestra en 1.0 mL. de isooctano grado plaguicida J.T. Baker. Con ayuda de una pipeta Pasteur, la solución final fue almacenada en frascos de vidrio color ámbar de 2.0 mL. de capacidad con taparrosca de bakelita para luego preservarlos en refrigeración a 4°C. hasta su análisis.
- ❖ Cada muestra fue analizada por un cromatógrafo de gases con detector de captura de electrones (CG-ECD), modelo Autosystem, marca Perkin-Elmer (EPA, 1995).
- ❖ Se utilizó una preparación de referencia de plaguicidas organoclorados de la cual se obtuvieron los tiempos de retención para compararlos con los obtenidos en las muestras.
- ❖ Tanto la preparación de referencia como las muestras fueron inyectadas en el cromatógrafo de gas con detector de captura de electrones (CG-ECD), con el empleo de una micro jeringa Hamilton de 1.0 µL. Se inyectó una alícuota de 1.0 µL con las siguientes condiciones instrumentales de trabajo:

Temperatura del inyector = 180 °C



Temperatura del detector = 300°C

Temperatura del horno = 80°C

Gas de arrastre; Helio

Gas auxiliar; Nitrógeno

Columna Bonded phase fused, Silica Capillary Column, 30m.; 0.53 mm. de diámetro interno 0.8µm Film Thickness, Methyl Phenyl Cyano Silicone, Cat. No. 403236, PEN° N931-2846.

Se obtuvieron los cromatogramas correspondientes a las muestras para la identificación y cuantificación de cada uno de los componentes. La identificación se hizo comparando los tiempos de retención de cada señal con los correspondientes en la preparación de referencia y la cuantificación se realizó comparando el área bajo la curva de cada señal (EPA, 1995).

Etapas de gabinete

Finalmente fueron comparadas las concentraciones obtenidas en las muestras de agua procedentes del humedal artificial con los límites permisibles según los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua establecidos por SEDUE y posteriormente establecer la eficiencia del humedal.

9. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de plaguicidas organoclorados.

El sitio de muestreo corresponde:

Muestra 1- Entrada de agua.

Muestra 6- Estanque II.

Muestra 2- Sedimentador.

Muestra 7- Estanque III.

Muestra 3- Entrada del humedal.

Muestra 8- Estanque IV.

Muestra 4- Salida del humedal.

Muestra 9- Estanque V.

Muestra 5- Estanque I.



Fig.11 Entrada de agua que corresponde a la muestra 1

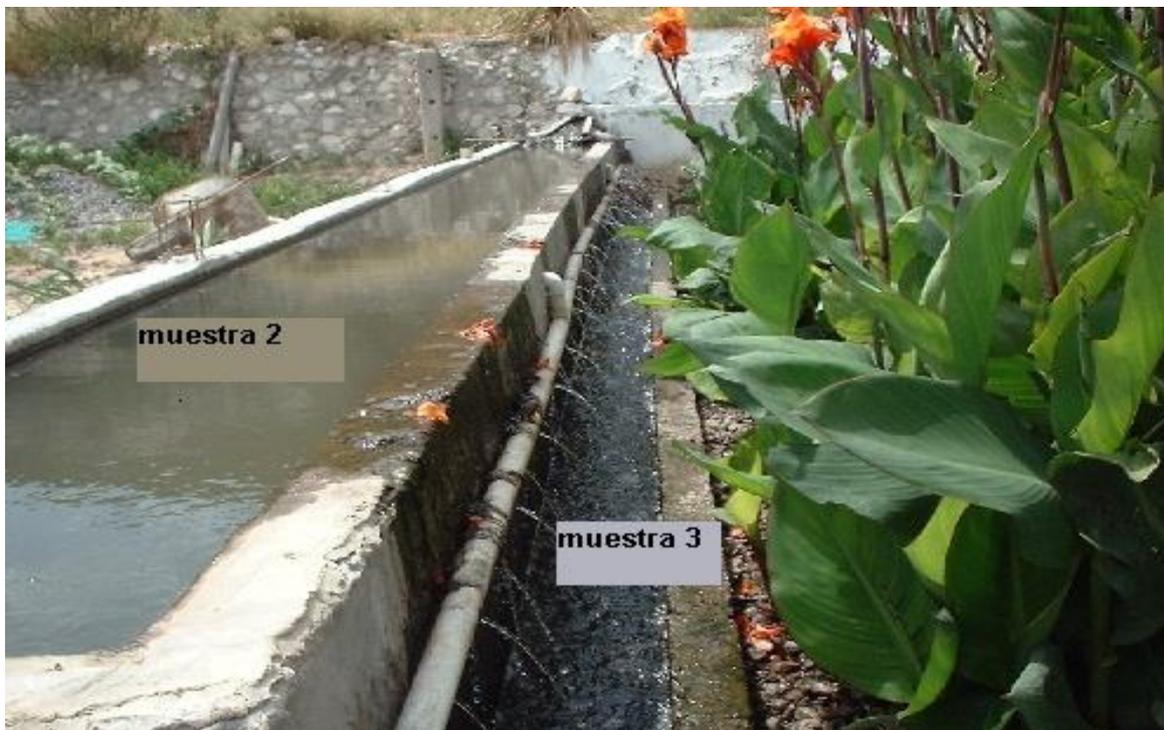


Fig.12 Sedimentador y entrada del humedal que corresponden a la muestra 2 y 3



Fig.13 Salida del humedal y estanque I que corresponden a la muestra 4 y 5



Fig.14 Estanques de producción piscícola que corresponden a la muestra 6, 7, 8 y 9



Cuadro 4. Concentración de LINDANO expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	ND	0.0001	ND	ND	0.0028
2	ND	ND	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	0.0022
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	0.0007	ND	ND	ND	ND
9	0.0023	ND	ND	ND	ND

ND: no detectado

Cuadro 5. Concentración de HEPTACLORO expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	0.0069	0.0002	0.0042	0.0079	0.0291*
2	ND	0.0002	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	0.0001	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	0.0242*
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	0.0042	0.0001	ND	ND	ND
9	0.0115	ND	ND	ND	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81

Cuadro 6. Concentración de HEPTACLORO HEPÓXIDO expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	0.0243*	0.0050	0.0219	0.0230*	ND
2	ND	ND	ND	0.0220*	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	0.0200	ND
6	ND	0.0010	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	0.0109	ND	ND	ND	ND
9	0.0137	ND	ND	0.0236*	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81



Cuadro 7. Concentración de DIELDRÍN expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	ND	ND	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	ND
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND	ND
9	0.0038	ND	ND	ND	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81

Cuadro 8. Concentración de ENDOSULFÁN II expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	0.0090	ND	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	ND
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND	ND
9	ND	ND	ND	0.0070	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81

Cuadro 9. Concentración de ENDRÍN ALDEHÍDO expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	ND	ND	ND	0.0035*	ND
2	ND	ND	ND	0.0030*	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	0.0012	ND
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND	ND
9	ND	ND	ND	ND	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81



Cuadro 10. Concentración de ppDDT expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	0.0027	ND	ND	ND	ND
2		ND	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	0.0009	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	ND
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND	ND
9	ND	ND	ND	ND	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81

Cuadro 11. Concentración de DIBUTILCLORENDATO expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	ND	0.0005	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	ND
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND	ND	ND
9	ND	ND	ND	ND	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81

Cuadro 12. Concentración de METOXICLORO expresado en mg L⁻¹

Muestra	Abril	Mayo	Junio	Julio	Octubre
1	0.0309*	0.0361*	0.0389*	0.0186	ND
2	ND	0.0290	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND	ND	ND
4	ND	0.0286	ND	ND	ND
5	ND	ND	ND	ND	0.0142
6	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	0.0095	ND	ND	ND
8	0.0312*	0.0324*	ND	ND	ND
9	0.0341*	0.0327*	ND	0.0283	ND

ND: no detectado

*Valores que están por encima de los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81



10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las propiedades de persistencia, toxicidad y capacidad de acumularse en organismos vivos hacen a los plaguicidas organoclorados sustancias nocivas. Pueden ser transportados grandes distancias y se han encontrado en sitios tan lejanos como el Ártico y el Antártico, en islas donde nunca fueron utilizados. Estos contaminantes migran de las regiones tropicales cálidas hacia las polares y frías (Kechavarzi, 2007).

LINDANO

En el Catálogo Oficial de Plaguicidas, publicado en 1998 en México por la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST), se señala que el lindano es un plaguicida de uso restringido en México por su alto índice de persistencia y gran movilidad en el ambiente.

Aunque en México no se produce la molécula de lindano, se sigue importando para la formulación de productos usados en cultivos e instalaciones pecuarias. Se utiliza principalmente como insecticida y como agente contra ectoparásitos en productos veterinarios y farmacéuticos (Shi, 2007).

Durante mucho tiempo se consideró que los isómeros de Lindano eran persistentes en medios aerobios pero sufren una rápida biodegradación en ecosistemas predominantemente anaerobios como por ejemplo suelos inundados y sedimentos de lagos. En México son limitados los estudios e investigaciones que se han realizado para determinar los efectos ambientales que ha tenido el lindano en nuestro 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.

En investigaciones realizadas en Chiapas se encontró lindano en sedimento del sistema lagunar Carretas-Pereyra. 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 esta sustancia en regiones agrícolas cercanas, en concentraciones suficientes para afectar la respiración del camarón y aumentar su estrés; esto puede ser

parte de la causa del aumento en la mortandad del camarón en esta región (Galindo, 2000). El río Blanco, en Veracruz, también muestra la presencia de este plaguicida en sedimentos y organismos acuáticos. En el Valle del Yaqui, Sonora, se encontraron altas concentraciones de plaguicidas organoclorados en suelo, entre ellos el lindano (Cámara, 1994).

Aunque algunos de los niveles de lindano encontrados en los citados estudios se encuentran por debajo de los estándares internacionales de límites permisibles, siguen sin embargo representando un riesgo para otras especies y para la población debido al proceso de biomagnificación (Vijgen, 2006).

En las Ciénegas del Lerma los resultados obtenidos en un estudio de plaguicidas organoclorados el compuesto de lindano rebaso unas cuantas unidades los niveles máximos establecidos permitidos en agua dulce (González, 2006).

Las concentraciones oscilaron desde no determinado hasta 0.0028mgL^{-1} . La concentración más alta de Lindano se puede atribuir a que la muestra tomada corresponde a la entrada de agua residual que abastece el humedal (fig.15).

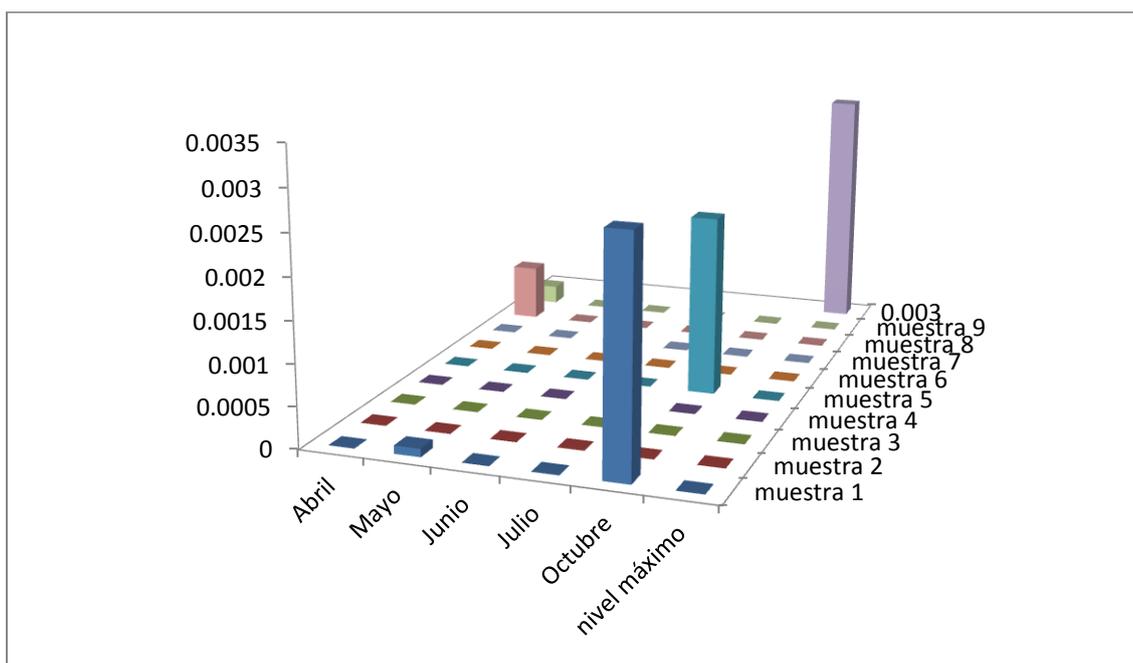


Fig. 15 Concentración del LINDANO en el humedal.



La presencia del Lindano en el humedal no rebaso los niveles máximos permitidos de acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 y se obtuvo una remoción del 78.5%.

HEPTACLORO

Este compuesto no está registrado en México y por tanto es un plaguicida prohibido, lo que significa que no puede ser producido, formulado, comercializado, usado e importado de manera legal en nuestro país. Según los autores, se desconoce si es usado de manera clandestina y aunque no se han realizado acciones que mitiguen el uso del heptacloro, el único logro hasta el momento es mantener la prohibición de su ingreso a nuestro país (Yarto, *et al.* 2003).

Primordialmente se utiliza como insecticida contra termitas, hormigas e insectos del suelo en cereales para semillas y en cultivos.

Debido a su prolongado período de permanencia, incluso una baja movilidad puede dar como resultado un movimiento apreciable; por ello cabe considerar que el heptacloro y su metabolito (el epóxido de heptacloro) plantean un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas con el tiempo. Se han encontrado niveles muy bajos de heptacloro en el agua de pozos. El epóxido de heptacloro no es muy susceptible de biodegradación, fotólisis, oxidación o hidrólisis en el medio ambiente (Wieczorek, 2007).

En el agua, el heptacloro se hidroliza con facilidad en un compuesto que luego se transforma también con facilidad en epóxido de heptacloro por la acción de microorganismos (preferiblemente en condiciones anaerobias). Después de la hidrólisis, la volatilización, la adsorción en sedimentos y la fotodegradación pueden ser vías importantes para la desaparición del heptacloro en medios acuáticos (Wieczorek, 2007).

En las cinco salidas realizadas se encontró heptacloro. En abril las concentraciones oscilaron desde no determinado hasta 0.0115mg L^{-1} sin rebasar los niveles máximos permitidos.

En mayo los niveles fueron desde no detectados hasta 0.0002mg L^{-1} , se apreció una ligera disminución a través del paso por el humedal.

En junio solo se presentó en la segunda muestra que corresponde a la entrada de agua que abastece el humedal.

En julio se detectó de 0.0079mg L^{-1} en la muestra 1 que corresponde a la entrada de agua que abastece el humedal..

En octubre se detectó en la muestra 1 que corresponde a la entrada de agua residual con un nivel de concentración de 0.0291mg L^{-1} y en la muestra 5 con una disminución de 0.0242mg L^{-1} rebasando ligeramente los niveles máximos permitidos (Fig. 16).

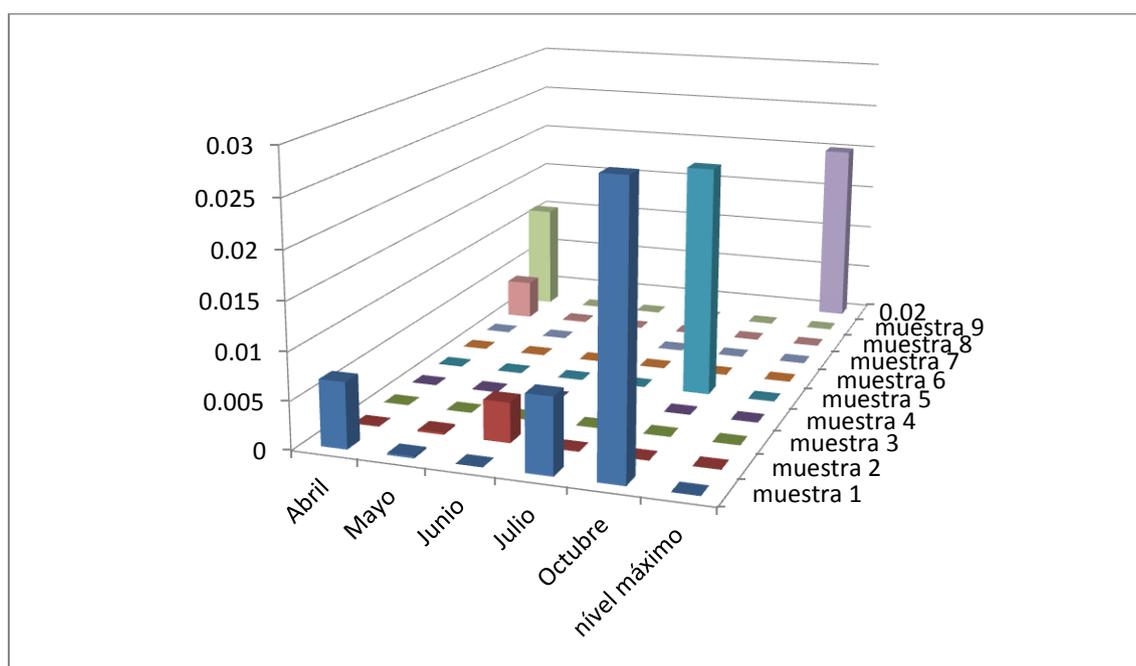


Fig. 16 Concentración del HEPTACLORO en el humedal.

Como se puede observar los niveles más altos de este plaguicida se presentaron en la entrada de agua residual y a la mitad parte del sistema rebasando ligeramente el límite permisible de acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua establecidos por SEDUE y se alcanzó una remoción del 87%.

HEPTACLORO EPÓXIDO

Dado que el Heptacloro epóxido es producto de degradación del Heptacloro, podría suponerse que se encuentren dichas sustancias a la par; sin embargo en algunos casos llama la atención que la presencia de este subproducto no siempre fue encontrado en todas las estaciones coincidiendo con Heptacloro. El Heptacloro epóxido, se detectó en las primera cuatro salidas. En abril se presentó una concentración de 0.0243mg L^{-1} en la

entrada de agua y de 0.0109 mg L^{-1} 0.0137 mg L^{-1} en la muestra 8 y 9 respectivamente que corresponden a estanques de producción piscícola.

En mayo los valores fueron de 0.0050 mg L^{-1} en la muestra 1 que corresponde a la entrada de agua y de 0.0010 mg L^{-1} en la muestra 6 corresponde a estanque de producción piscícola.

Para junio solo se presentó en la muestra 1 que corresponde a la entrada de agua con un nivel de 0.0219 mg L^{-1} . Por último en julio se detectó en la muestra 1 que corresponde a la entrada de agua 0.0230 mg L^{-1} , en la muestra 2 se presentó un nivel de 0.0220 mg L^{-1} , en la muestra 5 se obtuvo 0.0200 mg L^{-1} , finalmente, en la muestra 9 figuro 0.0236 mg L^{-1} , estos últimos corresponden a estanques de producción piscícola (fig.17).

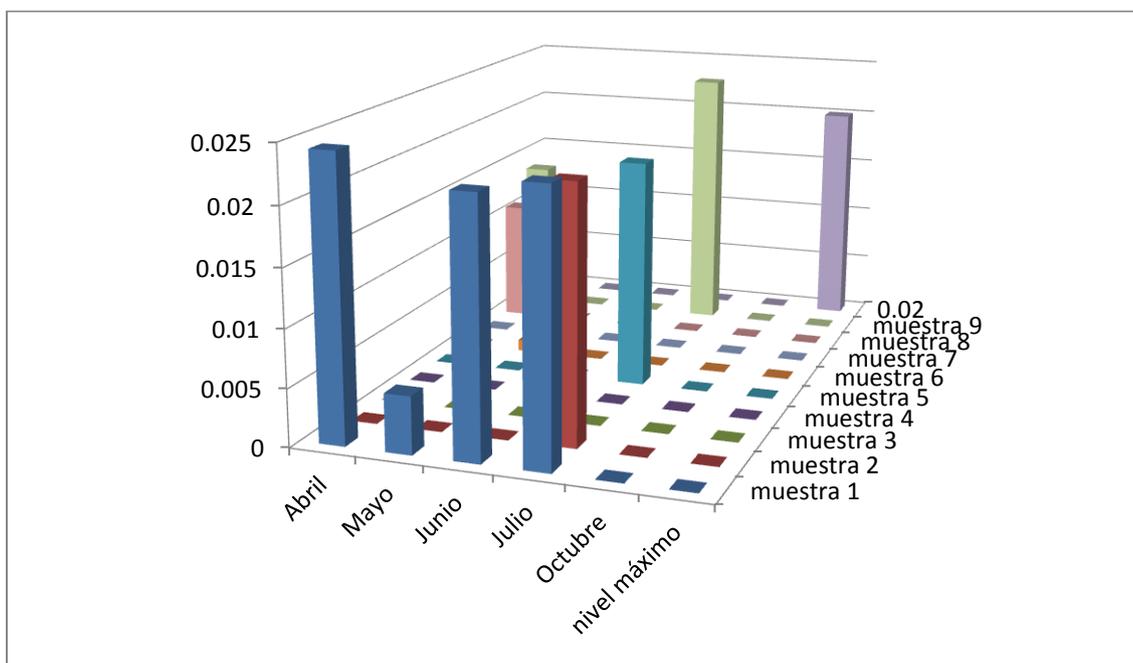


Fig. 17 Concentración del HEPTACLORO EPOXIDO en el humedal.

Los valores obtenidos de heptacloro y heptacloro epóxido rebasan los niveles máximos permitidos en al menos uno de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua establecidos por SEDUE aunque se logró una remoción del 86%. Esto puede indicar que hay aplicaciones recientes de heptacloro, sin importar las aportaciones del arrastre de suelo, en época de lluvias y que la irregular presencia de su epóxido (mucho más tóxico para los organismos en los que se llega a depositar) se debe a que aún no se ha degradado el compuesto que le da origen.



ALDRIN

Es utilizado como insecticida contra insectos del suelo y del algodón, plagas del césped, gusanos blancos y gusanos de la raíz del maíz.

Se estima que el aldrin se adsorbe moderadamente en el suelo. Los residuos de aldrin en el suelo y las plantas se volatilizan de la superficie del suelo o se transforman lentamente en dieldrin en el suelo. Se estima que la biodegradación es lenta y que el aldrin no se lixivia. El aldrin está clasificado como un producto moderadamente persistente, lo que significa que su semidesintegración en el suelo varía entre 20 y 100 días. Se estima que la fotooxidación del aldrin es considerable. Se ha observado fotólisis en agua, aunque las características de absorción del aldrin indican que no se fotoliza directamente en el medio ambiente en una medida significativa. El producto principal de la degradación del aldrin es el dieldrin (Wieczorek, 2007). El Aldrin no se detectó en ninguna etapa del sistema en todas las salidas realizadas.

DIELDRIN

Este estereoisómero del endrin se utiliza principalmente para proteger madera y estructuras de madera contra el ataque de insectos y termitas, y en la industria para combatir plagas textiles.

Su escasa solubilidad en agua y su fuerte adsorción en el suelo hacen que la lixiviación sea poco probable. Cuando se libera en un sistema acuático, no sufre hidrólisis ni biodegradación. Hay ciertos indicios de que puede formarse fotodieldrin a partir del dieldrin por la acción de microorganismos (Padilla, 2005).

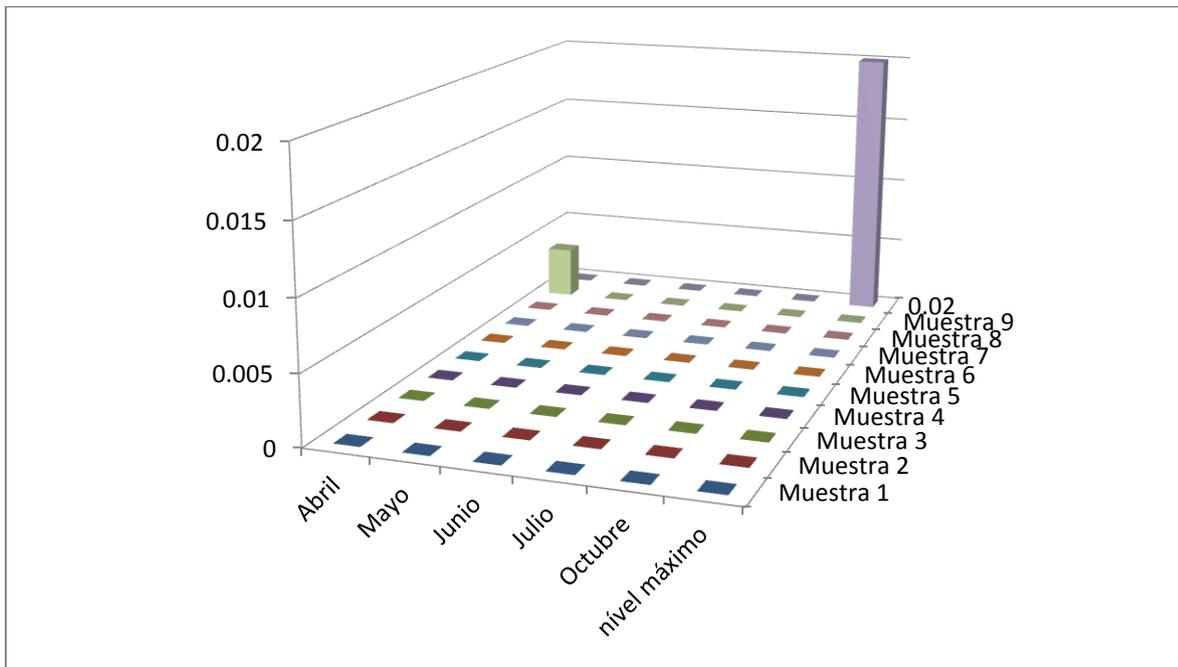


Fig. 18 Concentración del DIELDRIN en el humedal.

Este plaguicida se presentó en la muestra que correspondió al último estanque de producción piscícola durante el mes de Abril. El nivel de concentración no rebaso el límite permitido y se alcanzó una remoción de 95%.

ENDOSULFÁN I y II

Se utiliza como insecticida para cultivos de hortalizas.

El endosulfán es un plaguicida biodegradable que puede sufrir hidrólisis. Se han observado casos de semidesintegración por hidrólisis de 35,4 días (alfa-endosulfán) y 37,5 días (beta-endosulfán) con un pH de 7. Con un pH de 5,5, la semidesintegración puede llegar hasta 187,3 días para el beta-endosulfán. La hidrólisis del endosulfán se produce más deprisa en presencia de hidróxido férrico. Se compone de alfa-endosulfán y beta-endosulfán. El endosulfán es estable a la luz solar pero inestable en medios alcalinos. Se hidroliza lentamente y se oxida en presencia de vegetación durante el período de crecimiento (Calvelo, 2007).

El Endosulfán I no fue detectado durante el trabajo realizado.

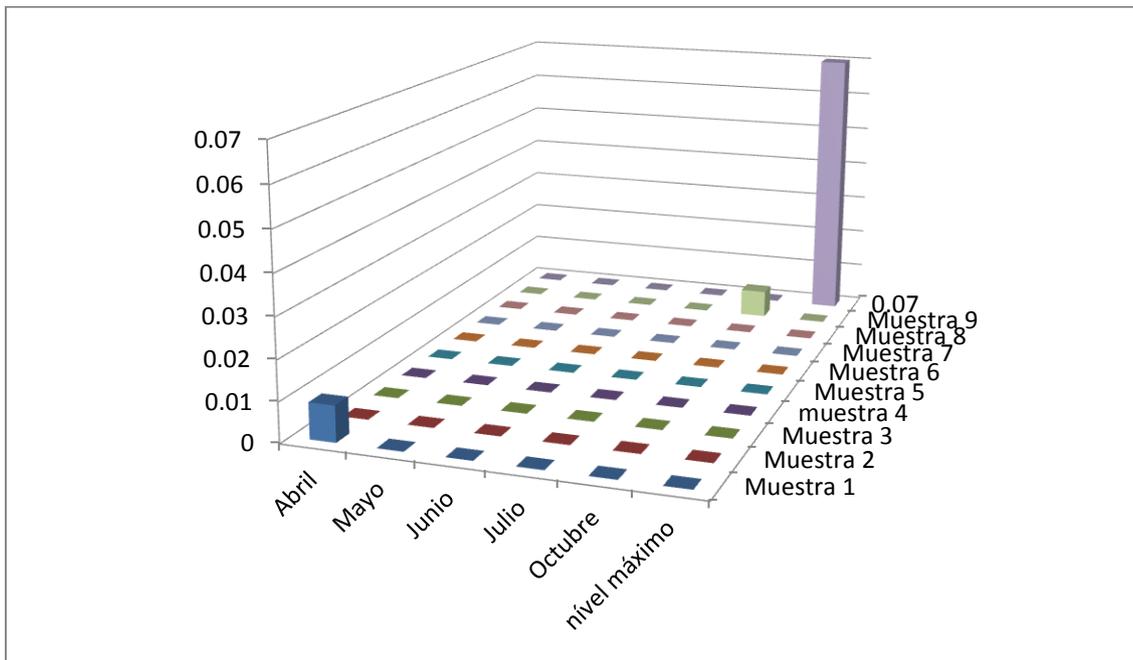


Fig. 19 Concentración del ENDOSULFÁN II en el humedal.

El Endosulfán II se detectó en dos ocasiones a lo largo del trabajo. Ambas concentraciones se encontraron por debajo de los límites de 0.07 mg L^{-1} con una remoción de 95%.

ENDRIN ALDEHIDO

El endrin es un insecticida foliar de amplio espectro que actúa frente a una gran diversidad de plagas agrícolas: insectos, roedores y pájaros (OMS, 2003). Es un plaguicida prohibido en México (CICOPLAFEST, 1994).

El endrin no se disuelve muy bien en agua. Se ha encontrado en agua subterránea y en aguas superficiales, aunque solamente en niveles muy bajos. Es más probable que se adhiera al sedimento del fondo de ríos, lagos y otras masas acuáticas (Padilla, 2005).

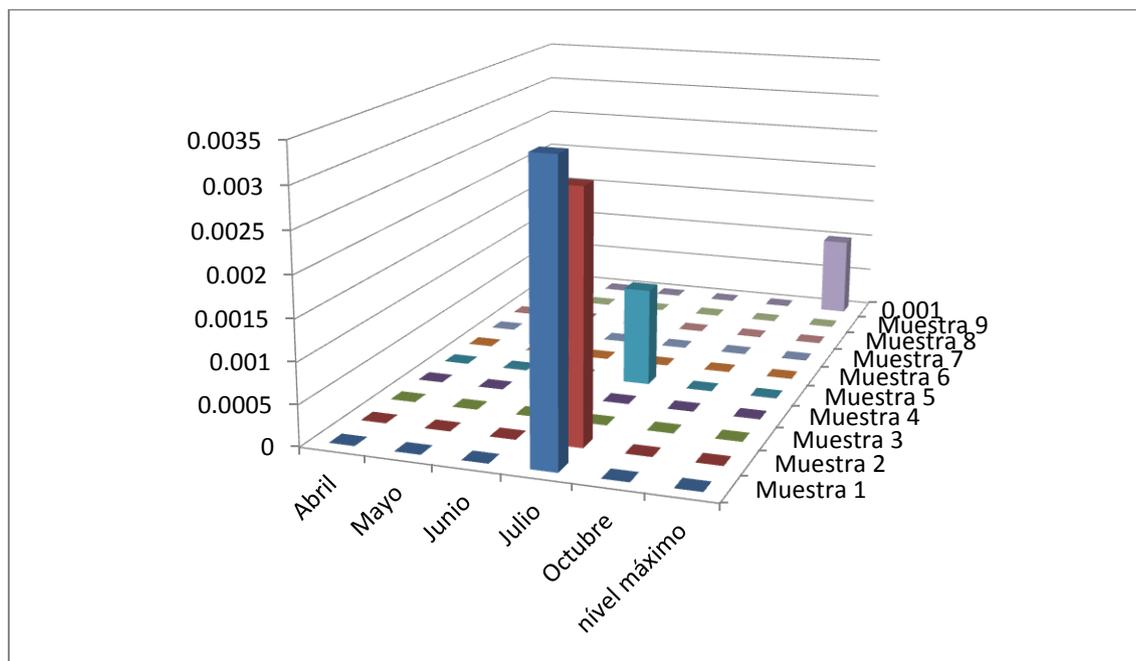


Fig. 20 Concentración del ENDRIN ALDEHIDO en el humedal.

Para el caso del endrin aldehído solo se detectó en el mes de julio, se observó la disminución en la concentración de la muestra 5 que corresponde a un estanque de producción piscícola con respecto a la muestra 1 perteneciente a la entrada de agua con una remoción de 93%.

DDT

Se utiliza como insecticida no sistémico de ingestión y contacto. Es el plaguicida más utilizado en México por su actividad para combatir el paludismo. Es un plaguicida de uso restringido en México y prohibido en otros países.

El DDT (Diclorodifeniltricloroetano) no es móvil. Se adsorbe intensamente en el suelo y no se lixivia en las aguas subterráneas. En el agua es susceptible de evaporación, y su semidesintegración por ese motivo se estima entre varias y 50 horas. La descomposición directa de un compuesto por la luz en una solución acuosa es muy lenta, siendo la semidesintegración superior a 150 años. Los procesos indirectos de fotólisis (iniciados por sustancias naturales) pueden ser un paso importante en la transformación del DDT; en ese caso su semidesintegración es de unos pocos días. La biodegradación en el agua es por lo

general deficiente. Los productos típicos de reducción metabólica o química son DDE (diclorodifenildicloroetileno) en condiciones aerobias y DDD (diclorodifenildicloroetano) a DDA en condiciones anaerobias.

La persistencia de este compuesto no solo se remite a su gran afinidad por las grasas sino por otro lado a la interacción en el medio ambiente como por ejemplo, los suelos. Un estudio hecho en Nairobi, Kenia, reveló que la fuerte retención de agua por el suelo está íntimamente ligada con la velocidad de degradación del DDT, así en las zonas costeras es común encontrar en altas concentraciones el metabolito DDE en tanto que en las zonas de inundación, se encuentra en menor concentración contrario a las que se encuentran de DDT (Kiflom, *et al.* 2001).

En el noroeste de México, se encontraron altas concentraciones de DDT y otros plaguicidas en un sistema de drenado agrícola, con una media de concentraciones de 540 mg L^{-1} , que se comparan a niveles hallados en ríos de Asia, donde el DDT ha sido muy utilizado.

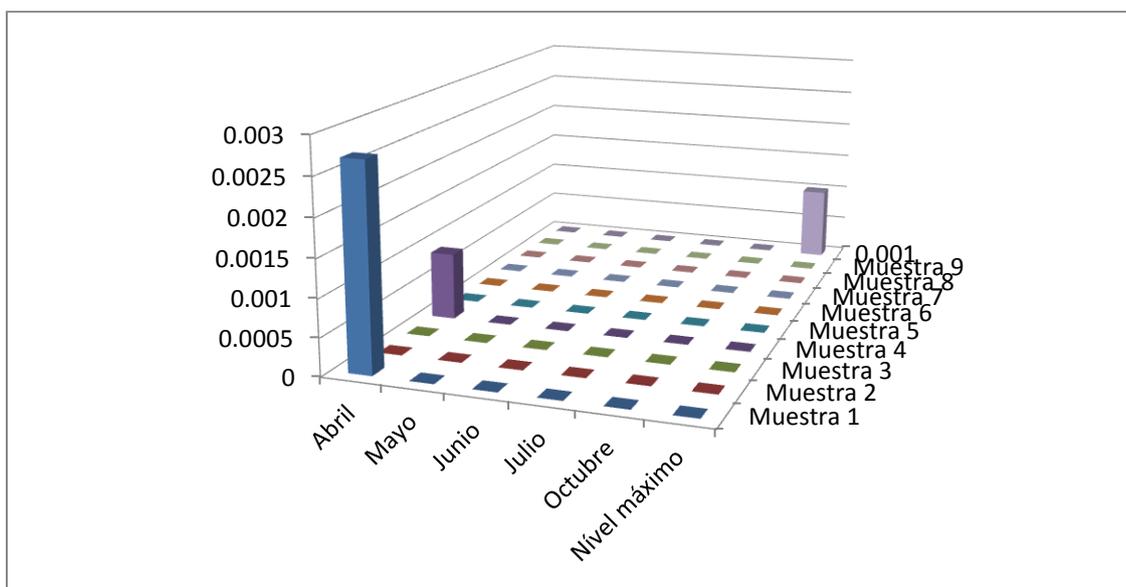


Fig. 21 Concentración del DDT en el humedal.

La presencia de este plaguicida se detectó en la entrada de agua que abastece el humedal y en la parte aeróbica del sistema durante el mes de abril, donde se logro apreciar



una remoción de 95% considerando los límites permitidos de acuerdo al Criterio de Calidad del Agua de 0.001mg L^{-1} .

En la preparación de referencia no se incluye la presencia de metabolitos propios del DDT (DDE y DDD), por lo que se ignora si la escasa presencia de DDT se debe a la transformación en los subproductos ya mencionados.

DIBUTILENCLORENDATO

Pese a que este compuesto fue encontrado en una sola muestra durante el transcurso de todo el trabajo no existe un parámetro de comparación que permita establecer si este compuesto rebasa los niveles permisibles en CE-CCA-001/89. De hecho, no existen referencias acerca de este compuesto en la literatura ni informes por parte de las normas internacionales como EPA, que den información acerca de este plaguicida. Se presentó una remoción de 90%.

METOXICLORO

El metoxicloro es un insecticida que se utiliza en la producción de hortalizas, frutales, árboles, forrajes y animales de granja. Es poco soluble en agua y muy poco móvil en la mayoría de los suelos agrícolas; en condiciones normales de uso no constituye, según parece, un riesgo ambiental. Por ello el uso de este compuesto en nuestro país es de uso restringido

Los metabolitos ambientales principales son los productos desclorados y desmetilados, que se forman en mayor medida en condiciones anaerobias que en condiciones aerobias. También hay posibilidades de que la sustancia original y sus metabolitos se acumulen en los sedimentos de aguas superficiales. Por lo tanto, el uso del metoxicloro probablemente no resultará en una contaminación ambiental a largo plazo (OMS, 2003).

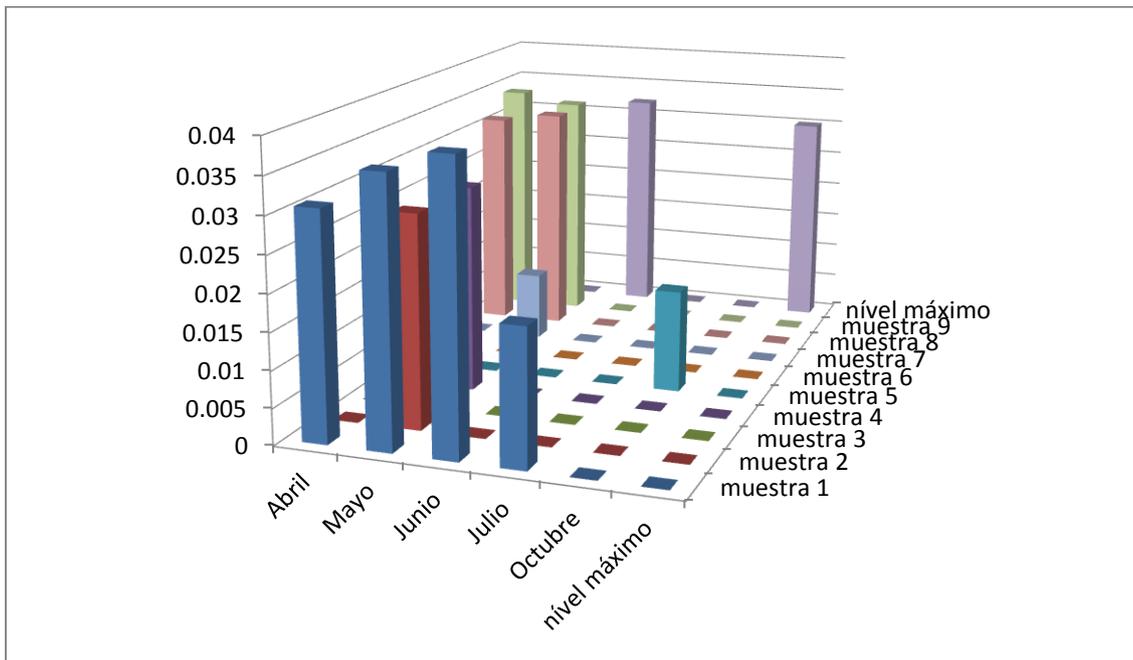


Fig. 22 Concentración del METOXICLORO en el humedal.

En abril las concentraciones de metoxicloro que se encontraron en tres muestras del sistema rebasaron los niveles máximos establecidos. Los valores altos se presentaron en la entrada de agua y en los últimos estanques de producción piscícola debido a que existe una alimentación directa del canal en los últimos estanques.

En mayo las concentraciones disminuyeron considerablemente, solo en dos muestras que correspondieron a estanques de producción piscícola los niveles fueron ligeramente rebasados.

En junio se registró una concentración de 0.0389 mg L^{-1} en la entrada de agua.

En julio la concentración en la entrada del canal fue de 0.0186 mg L^{-1} .

En octubre este plaguicida se presentó en la muestra 5 sin rebasar los límites permitidos.

De acuerdo a los niveles máximos establecidos en CE-CCA-001/89, la concentración máxima para Metoxicloro es de 0.03 mg L^{-1} con una remoción de 79%.



11. CONCLUSIONES

Los plaguicidas organoclorados, en general, presentan muy bajas concentraciones y puede atribuirse a que la mayoría pueden ser absorbidos por la rizósfera de las plantas de ornato que son cultivadas en el humedal.

En general los plaguicidas organoclorados rebasan ligeramente los límites máximos permisibles por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89).

La zona del humedal que presentó mayor detección de plaguicidas organoclorados correspondió al primer punto de muestreo que corresponde a la entrada que abastece el humedal.

Las cantidades reportadas en los resultados no se consideran dañinas para los peces que se producen en los estanques. Además, en algunos casos es evidente una retención de los mismos, aunque varía el lugar en el que se retiene en mayor cantidad. Se plantea como una alternativa que la retención de los plaguicidas se lleva a cabo por efecto de precipitación anaeróbica y en los sedimentos.



12. RECOMENDACIONES

El agua residual que llega al Valle del Mezquital no tiene altos niveles tóxicos aunque en ocasiones se presentan cantidades variables de pesticidas organoclorados.

A continuación se mencionan algunas recomendaciones para lograr mejor eficiencia del humedal.

- Dejar de abastecer los estanques piscícolas con agua que llega directamente del canal, ya que esto disminuye la eficiencia del humedal y provoca la entrada directa de contaminantes al sistema.
- Se tiene que hacer una limpieza constante de los sedimentos acumulados en los diferentes puntos del humedal, porque pueden en algún momento afectar los parámetros a la hora de ser evaluados.
- Dar seguimiento a la calidad del recurso y de los productos derivados del sistema, realizando análisis físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales crudas posterior a su paso por los módulos en cada estanque y antes de ser utilizadas.
- Realizar un seguimiento de este trabajo, con la finalidad de observar el comportamiento del humedal a largo plazo y que este proyecto sea extensivo a otras zonas que presentan el mismo problema que en este distrito de riego.



13. REFERENCIAS

- Ahmad, M.N., Lim, P.E., Koh, H.L. y Shutes, R. 2002. Constructed wetlands for runoff treatment and wetlands: bringing partnerships modeling. In: Ahyaudin, A., Salmah, C.R., Mansor, M., Nakamura, R., Ramakrishna, S & Mundkur, T. Proceedings of a workshop on the Asian into good wetland practices. E.U.
- Amaral, J. A. y Knowles, R. 1994. Methane Metabolism in a Temperate Swamp. *Applied and Environmental Microbiology*, 60 (11): 3945-3951.
- Arias, C. A. 1998. Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeños Núcleos de Población. Tesina de Especialidad. Departamento de EHMA.
- Baird, C. 2001. *Química ambiental*. Reverté. España.
- Belmont, M.A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sánchez, A. y Metcalf C.D. 2004. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central México.
- Best, A. G. y Dawson, P. 1993. Environmental analysis using gas chromatography. *Gas chromatography*. Edited P.J. Baugh. Oxford University Press. New York.
- Brix, H. 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.* 29 (4): 71-78.
- Calvelo P. 2007. Distribution pathways of hexachlorocyclohexane isomers in a soil-plant-air system. *Environmental Pollution*.
- Cámara, D. O. A. 1994. Impacto en la agricultura bajo riego sobre la calidad del agua: caso del Valle del Yaqui, Sonora. *Ingeniería Hidráulica en México*. 9 (3): 57-71.
- Castro, A. 2003. Producció de metà en aiguamolls construïts de flux Subsuperficial. Tesina de Especialidad. Departamento de EHMA.
- Chico, F.L. 2002. Vías de degradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Tesina de Especialidad. Departamento de EHMA.



- CICOPLAFEST.1994. Comisión Intersecretarial para el control del proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas, Catálogo Oficial de Plaguicidas. México.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 2005. El agua en el valle de México. México.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. 2000. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Mc Graw-Hill. Bogotá.
- Dirección General de Normas, DGN. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-71-1981, Análisis de Agua para Determinación de Plaguicidas Organoclorados mediante el Método de Cromatografía de Gases. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.
- Dushenkov S. 2003. Trends in phytoremediation of radionuclides, Plant and Soil. 249: 167 - 175
- Elida Nodal B. 2001. Procesos Biológicos Aplicados Al Tratamiento de Agua Residual. Ingeniería Hidráulica Ambiental. 12 (4): 52-56.
- Ellen L. K., Todd A. A. y Joel R. C. 1997. Phytoremediación of soil and water contaminants. American Chemical Society. Washington DC.
- Environmental Protection Agency. EPA. 1995. METHOD 508- Determination of chlorinated pesticides in water by gas chromatography with an electron capture detector. Environmental Protection Agency. E. U.
- EPA. 1995. METHOD 508- Determination of chlorinated pesticides in water by gas chromatography with an electron capture detector. Environmental Protection Agency. E. U.
- EPA. 2003. Draft Report on the Environment Technical Document. U.S.A.
- EPA, 2000, Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment, U.S. EPA, OWM, Washington, D.C.
- Gaceta Ecológica. 1990. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89). SEDUE.
- Galindo, R. 2000. Condiciones ambientales y de contaminación en los ecosistemas costeros de Sinaloa. Universidad Autónoma de Sinaloa, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México.



- García, J., Ruiz, A. y Junqueras, X. 1997. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*. Portugal. 165: 58-6
- García, J. 2003. Design factors of horizontal flow constructed wetlands. *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*. Instituto Nacional de Agua. Portugal.
- Gitahi, S.M. y Harper, D.M. 2002. Organochlorine and organophosphorus pesticide concentrations in water, sediments and selected organisms in Lake Nivasha Kenya. *Hidrobiología*. 488: 123-128.
- González, F. A.V. 2006. Estudio de plaguicidas organoclorados en los cuerpos acuáticos del área natural protegida ciénegas del Ierma, estado de México. Tesis: Biólogo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. D.F.
- Hamer, A.D. 2000. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Ed. Lewis Publisher. E.U. samples. *Chemosphere*. 52:825-833.
- Harvey P., Campanela B., Castro P., Harms H., Lichtfouse E., Schäffner A., Smrcek S. y Werck D. 2002. Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols. *Environ. Sci. Pollut.*
- Hidalgo, M. D. y García, P.A. 2001. Influencia del sulfato en la degradación anaerobia de la materia orgánica. *Ingeniería Química*, 383: 183-190.
- INEGI. 2005. Estadísticas de población, censo anual. México.
- Jackson, R. B., Carpenter S. R., Dahm, C.N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel S. L. y Running, S. W. 2001. *Water in a Changing World*. *Issues in Ecology*. No. 9.
- Jian, W., Chen, J., William, R. y Cunningham, R. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ. Sci. Technol.* 31: 800-805.
- Joner, E. y Leyval, C. 2003. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. *Environ. Sci. Technol.* 37: 2371-2375.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. y Haberl, R. 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp.



- Kassel, G., Ghoshal, D. y Goyal, A. 2002 Phytoremediation of trichloroethylene using hybrid poplar. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 8: 3-10.
- Kechavarzi, C. 2007. Root establishment of perennial ryegrass in diesel contaminated subsurface soil layers. *Environmental Pollution*. 145: 68-74.
- Kiflom, W.G. Wandiga, S.O; Kamau, G.N. 2001. Status of organochlorine (DDT) pollutants and steps toward electrocatalytic reductions. *Pure Applied Chemistry*. 73: 1907-1916.
- Mackova, M., D. N. Dowling y T. Macek. 2006. *Phytoremediation and Rhizoremediation: Theoretical background*. Springer. Doordrecht.
- Mander, Ü., Kuusemets, V., Lohmus, K., Muring, T., Teiter S. y Augustin, J. 2003. Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Wat. Sci. Tech*. 48(5), 135-143.
- Mc Murry, J. 2008. *Química Orgánica*. Cengage learning. E.U.
- Meneses, M. H. R. 2001. Contaminación de Suelos por el uso de plaguicidas. [Tesis de Licenciatura](#). FES Cuautitlán, UNAM. México.
- Mejía, S. E., Palacios, V. E., A., García, E. y Santos, H. A. L. 2002. Problemas operativos en el manejo del agua en Distritos de Riego. *TERRA* 20(2).
- Metcalf y Eddy. 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. McGraw-Hill E.U.
- Miya, K. y Firestone, K. 2001. Bioremediation and biodegradation. *J. Environ. Qual.* 30, 1911-1918.
- Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. 2000. *Wetland*. Wiley John and Sons, Inc. New York. E.U.
- Moshiri, A. G. 2000. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publisher. E.U.
- Mujeriego, R., García, J. y Gullón, M. 2000. *Manual de Prácticas de Laboratorio de Aguas Residuales*. Departamento de EHMA.
- Murayama, H.N. y Moriyama, H. 2003. Evaluation of activated carbón fiber filter for sampling of organochlorine pesticides in environmental water. E.U.
- NMX-AA-003-1980. "Aguas residuales-muestreo". [http:// www.economia-noms.gob.mx/](http://www.economia-noms.gob.mx/).



- NOM-AA-014-1980. “Cuerpos receptores-muestreo”. [http:// www.economia-noms.gob.mx/](http://www.economia-noms.gob.mx/).
- Núñez, L., Meas Y., Ortega B. y Olgúin J. 2004. Fitorremediación fundamentos y aplicaciones. Ciencia. 69-82.
- Organización Mundial de la Salud, 2003. Endrin in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Suiza.
- Organización Mundial de la Salud. 2003. Methoxychlor in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Suiza.
- Organización Mundial de la Salud. 2005. Clasificación toxicológica de los plaguicidas. México.
- Pacheco, R. D. 2004. Determinación de plaguicidas organoclorados y validación de lindano en agua potable por cromatografía de gases de alta resolución.
- Tesis: Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. D.F. México.
- Padilla, V. B., Diez, S., y Ordóñez, G. S. 2005. Tratamiento de efluentes acuosos contaminados con compuestos organoclorados. Ing. del Agua. 12(4):361-375.
- Patrick, G. L. 2004. Organic Chemistry. Bios Scientific Publishers. E. U.
- Philips, B.C. Lawrence, A.I. Nawang, W. M. 2002. Constructed Ponds and Wetlands in tropical urban areas. In: Proceedings an International conference on urban hidrology. Kuala Lumpur. Malasia.
- Pivetz, B., Cochran R. y Huling S. (1997). Abstract: Phytoremediation of PCP and PAH- contaminated soil. Poster 54. In 12th Annual Conference on Hazardous Waste Research Abstracts Book. Kansas City.
- Ramalho, R. S. 1996. Tratamientos de Aguas Residuales. Ed. Reverte S.A. Madrid, España.
- Revenga, C. J., Brunner, N., Henninger, K., Kassem and Payne R.. Pilot Analysis of Global Ecosystems, 2005: Freshwater Systems. World Resources Institute, Washington D.C. E.U.



- Ramsar Convention. ¿Qué son los humedales? 2006. Documento informativo Ramsar N°1 Disponible en <http://ramsar.org/about>
- Robusté, J. 2004. Humedales en explotación, experiencia en Catalunya. Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Rodier, J., Laporte, J. y Plissier, M. 1991. Análisis de aguas, aguas naturales, aguas residuales, agua de mar, Química, Fisicoquímica, Bacteriología. Traducción al Español de Santiago B. Dolz. Madrid, España.
- Romero, R. 1999. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. Alfaomega. México.
- Rosales, H. y Santos G. 2011. Evaluación de la calidad del agua residual tratada en un humedal de flujo sub-superficial y su producción florícola, municipio de Tetipac Guerrero, México. Tesis: Biólogo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. D.F. México.
- SEMARNAP. 1996. Serie Plaguicidas. Lo que usted debe saber sobre los plaguicidas. México.
- Senan, R. y Abraham T. 2004. Bioremediation of textile azo dyes by aerobic bacterial consortium. Mc. Graw-hill. E.U. 4: 275-280
- Shi, Y. 2007. Comparative effects of lindane and deltamethrin on mortality, growth, and cellulase activity in earthworms (*Eisenia fetida*). Pesticide Biochemistry and Physiology, 89:31-38.
- Siciliano, S., Germida J., Banks K. y Creer C. 2003. Changes in microbial community composition and function during a polyaromatic hydrocarbon. Appl. Environ. Microbiol. 69: 483-489.
- Skoog, D.A. 2001. Principios de análisis instrumental. Quinta edición. Mc. Graw-Hill. España.
- Stepniewski, W. y Stepniewska, Z. 2000. Oxygenology Treatment Wetlands and Its Environmental Effects. 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: 671-678.



- Swackhamer, D.L., Paerl, H. W., Eisenreich, S. J., Hurley, J. and Hornbuckle, K. C. M. 2004. Impacts of Atmospheric Pollution on Aquatic Ecosystems. Issues in Ecology <http://www.esa.org/science/issues>.
- Tanner, C.C. 2001. Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. Water Science and Technology. E.U.
- Tchobanoglous, G. 2002. Aquatic plant systems for wastewater treatment. Mc. Graw-Hill. Bogotá
- Telysheva G., Dizhbite T., Lebedeva G., Rossinskaja G., Jurkjane V., Treikale O., Yiesturs U. y Daugavietis M. 2002. Lignin- based products stimulating soil phytoremediation. Acta Biotechnol. 22, 167-173
- Urbieta, F. E., López, M. V. 2004. Determinación de plaguicidas organoclorados en la presa El Manantial y el Río Papalotes. Tesis: Biólogo. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. D.F. México.
- USEPA. 1996. Bioremediation of hazardous waste site: practical approaches to implementation. EPA 625-K-96-00.
- Vijgen, J. 2006. The legacy of lindane HCH isomer production. International HCH and pesticides association.
[URL:http://www.ihpa.info/docs/library/Lindane%20Main%20Report%20DEF20JAN06.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/Lindane%20Main%20Report%20DEF20JAN06.pdf).
- Wieczorek, J. K. 2007. Phytotoxicity and accumulation of anthracene applied to the foliage and sandy substrate in lettuce and radish plants. Ecotoxicology and Environmental Safety. 66: 369-377.
- Yarto, M., Gavilán, A. y Barrera J. 2003.El convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y sus implicaciones para México. Gaceta Ecológica INE-SEMARNAT .69: 8-29.
- <http://www.travelbymexico.com/estados/hidalgo>.



ANEXOS

ANEXO I

Ventajas e inconvenientes de los humedales

Al igual que otros sistemas naturales de depuración, los humedales construidos presentan algunas ventajas frente a los sistemas convencionales mecanizados, entre las cuales cabe destacar (García *et al.*, 2003):

- ❖ Simplicidad en la operación. Requieren un tiempo bajo de operarios y pocos equipos electromecánicos.
- ❖ Consumo energético mínimo o nulo. En general limitado al pretratamiento o a elevaciones.
- ❖ Baja producción de residuos durante la operación del sistema. Los residuos y fangos se suelen limitar a los generados por el pretratamiento y el tratamiento primario.
- ❖ Bajo costo de explotación y mantenimiento en la operación del sistema. Esta ventaja es en realidad una consecuencia de las anteriores (Robusté, 2004).
- ❖ Fiabilidad en la operación del sistema de tratamiento. Son sistemas con tiempos de permanencia hidráulicos muy altos con lo que variaciones puntuales de caudal o carga contaminante afectan poco al nivel de depuración.
- ❖ Bajo impacto ambiental sonoro y buena integración en el medio ambiente natural.
- ❖ Creación y restauración de zonas húmedas aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo. Requieren una superficie netamente superior.



Los principales inconvenientes frente a los sistemas convencionales son:

- ❖ Costo de construcción similar, o incluso mayor si se debe adquirir el terreno donde se realiza la obra. La necesidad de equipos en instalaciones convencionales se ve compensada por los grandes movimientos de tierra que se precisan en sistemas de humedales. Se debe estudiar cada proyecto en particular.
- ❖ Larga puesta en marcha. Desde algunos meses o un año en sistemas con flujo subsuperficial hasta varios años en sistemas con flujo superficial (Kadlec *et al.*, 2000).
- ❖ Difíciles de diseñar bien dado el alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes. No hay un acuerdo claro en cuanto a los valores de parámetros necesarios para el diseño.
- ❖ Pocos o ningún factor de control durante la operación. En muchos casos sólo se puede controlar la profundidad del agua. Los errores de diseño o constructivos son muy difíciles de corregir de forma sencilla. Si el efluente no tiene la suficiente calidad es complicado mejorarlo sin la necesidad de hacer una buena inversión.
- ❖ Los de flujo subsuperficial son muy susceptibles a la colmatación del medio granular si el agua tiene un contenido elevado en determinados contaminantes, como por ejemplo grasas y aceites. También se colmatan si reciben aportes continuados de materiales finos inertes, por ejemplo debido a la escorrentía superficial. Es muy costoso reemplazar el medio granular. En principio se parte de la idea que no se deberá reemplazar el material granular. Es posible que generen en mayor proporción gases del efecto invernadero con un gran potencial de calentamiento global (CH_4 y N_2O) (Mander *et al.*, 2003). Este es un aspecto que requiere de investigación.

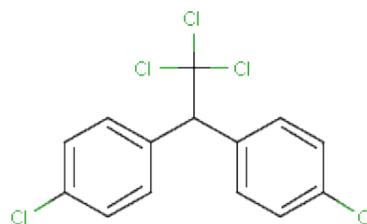
ANEXO II

Características de plaguicidas organoclorados

Nombre Común: DDT

Fórmula química: $C_{14}H_6Cl_5$

Peso molecular: 354.3 g/mol



Propiedades físicas y químicas: Es un cristal incoloro o polvo blanco. Tiene punto de ebullición de 260°C y punto de fusión de 109°C. Es una molécula muy lipófila e insoluble en agua, es decir, se disuelve bien en las sustancias grasas, pero no lo hace en las acuosas.

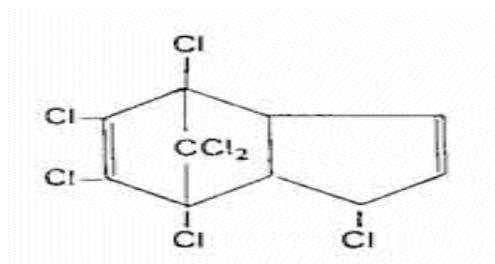
Producción y usos: Fue empleado de manera generalizada para proteger de plagas las cosechas de todo el mundo, hasta que en el siglo pasado la opinión pública conociera el impacto medioambiental del empleo de este compuesto sintético

Nombres registrados: Clofenotano

Nombre Común: Heptacloro

Fórmula química: $C_{12}H_8Cl_6O$

Peso molecular: 373.3 g/mol



Propiedades físicas y química: Es un sólido cristalino blanco con un leve olor a alcanfor, con un punto de fusión de 93 °C (46-74 °C para el producto técnico) y una densidad de 1.65-1.67 g/mL a 25 °C. Tiene un punto de ebullición de 135 a 145 °C y una presión de vapor de 4×10^{-4} mm Hg a 25 °C.

Es virtualmente insoluble en el agua (0.056 mg/L) pero bastante soluble en los solventes orgánicos. Es estable a la luz solar, aire, humedad y en el calor moderado (160 °C) pero se oxida biológicamente a epóxido de heptacloro (Whetstone, 1964 citado en OMS, 2005).

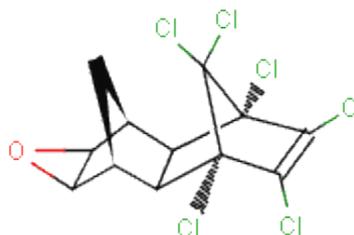
Producción y usos: El heptacloro fue introducido en los EUA en 1952 por primera vez como un insecticida por contacto para aplicación foliar, del suelo y estructural, así como para el control de la malaria. Es un insecticida no sistémico, estomacal y por contacto. Hoy en día el uso del heptacloro se limita, casi en forma exclusiva, al control de los insectos de la tierra y termitas (OMS, 2005).

Nombres registrados: Heptagran, Basaklor, Drinox, Soleptax, Termide Gold Crest H-60 y Velsicol.

Nombre común: Endrín

Fórmula molecular: $C_{12}H_8Cl_7O$

Peso molecular: 380.9 g/mol



Propiedades Físicas y Químicas: Es un sólido cristalino con un leve olor. El compuesto técnico es estable cuando se almacena a temperatura ambiente; también lo es en las formulaciones que contienen agentes alcalinos, emulsivos, agentes humectantes y solventes. Se descompone con ácidos minerales concentrados, catalizadores ácidos, agentes oxidantes ácidos y metales activos. Cuando se le calienta a más de 200°C, la sustancia forma un compuesto menos tóxico y menos activo desde el punto de vista de los insecticidas, el delta-cetoendrín. Tiene un punto de fusión de 226-230°C aunque por arriba de 200°C se descompone. Insoluble en agua, pero sí en acetona, benceno, tetracloruro de carbono y xileno; apenas soluble en alcohol y moderadamente soluble en hidrocarburos alifáticos.

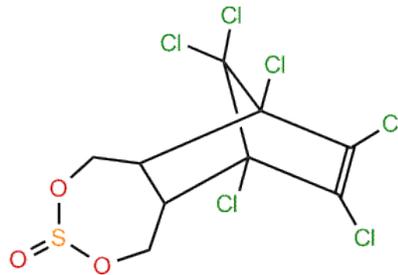
Usos: Es un veneno de contacto y estomacal, utilizado como insecticida foliar, que actúa contra una amplia gama de plagas, en particular contra los lepidópteros. Puede ser

empleado en concentraciones de 0.2-0.5 Kg/ha en algodón, maíz, caña de azúcar, arroz de altura, y muchos otros cultivos (OMS, 2005).

Nombre común: Endosulfán

Fórmula molecular: $C_9H_6Cl_6O_3S$

Peso molecular: 406.9 g/mol



Propiedades físicas y químicas: Es una sustancia cristalina parda que consiste de isómeros alfa y beta en una proporción aproximada de 70:30. su pureza es del 94 al 96 %. El endosulfán de grado puro es un sólido cristalino incoloro. Su solubilidad en agua es baja, inferior a 0.5 mg/L a 20 °C, pero aumenta al disminuir el pH. Su solubilidad en otros disolventes varía de 5 a 65%.

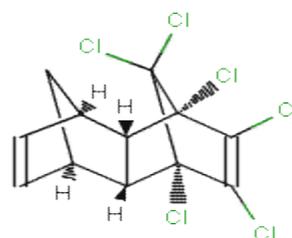
El endosulfán técnico suele venderse en forma de hojuelas cristalinas pardas con un leve olor a bióxido de azufre. Es estable a la luz solar, sensible a la humedad, inestable en medios alcalinos y está sujeto a una lenta hidrólisis.

Usos: La sustancia se utiliza en preparaciones como insecticida no sistémico de contacto y estomacal, principalmente en la agricultura, en el control de la mosca tse-tse, así como en el de las plagas de jardines caseros. Se usa en cultivo de algodón, tabaco y alimenticios como frutas, vegetales, cereales, semillas oleaginosas, tubérculos, té y café (OMS, 2005).

Nombre común: Aldrín

Fórmula química: $C_{12}H_8Cl_6$

Peso molecular: 364.9 g/ mol



Propiedades físicas y químicas: En su estado puro es un polvo blanco con un leve olor a

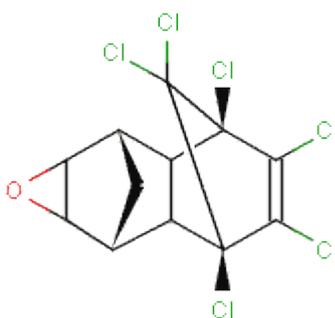
sustancia química y el comercial de menor impureza tiene color canela. No se encuentra en estado natural en el ambiente y se degrada rápidamente por oxidación a dieldrín. Es muy soluble en solventes orgánicos e insoluble en agua.

Usos: Desde los años 50's hasta los 70's se utilizó ampliamente como pesticida en cosechas, tales como maíz y algodón. Debido a preocupaciones acerca del daño al ambiente y sobre la salud pública, la EPA prohibió su uso en 1974, excepto para controlar termitas. En 1987, la EPA lo prohibió completamente.

Nombre común: Dieldrín

Fórmula química: $C_{12}H_8Cl_6$

Peso molecular: 364.9 g/ mol

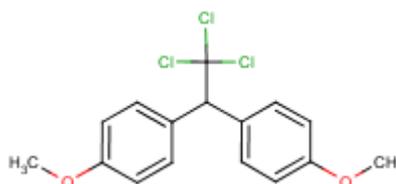


Propiedades físicas y químicas: En su estado puro es un polvo blanco con un leve olor a sustancia química y el comercial de menor impureza tiene color canela. No se encuentra en estado natural en el ambiente y se degrada rápidamente por oxidación a dieldrín. Es muy soluble en solventes orgánicos e insoluble en agua.

Usos: Desde los años 50's hasta los 70's se utilizó ampliamente como pesticida en cosechas, tales como maíz y algodón. Debido a preocupaciones acerca del daño al ambiente y sobre la salud pública, la EPA prohibió su uso en 1974, excepto para controlar termitas. En 1987, la EPA lo prohibió completamente.

Nombre Común: Metoxicloro

Fórmula química: $Cl_3CCH(C_6H_4OCH_3)_2$



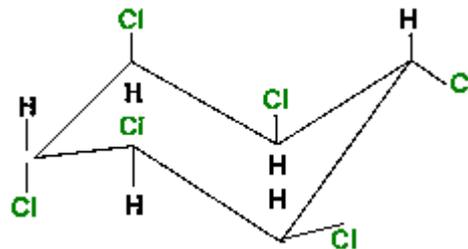
Propiedades físicas y químicas: Sólido cristalino blanco; p.f; 89° C; insoluble en agua. No compatible con materiales alcalinos. Moderadamente tóxico, menos tóxico que el DDT. La tolerancia en el aire es de hasta 15 mg/m³.

Usos: Insecticida utilizado en el combate de larvas de mosquito y en las moscas domésticas, se emplea frecuentemente en las granjas lecheras (Hawley, 1975).

Nombre Común: Lindano

Fórmula química: $C_6H_6Cl_6$

Peso molecular: 290.83 g/mol



Propiedades físicas y químicas: Es un sólido blanco cristalino, estable con la luz, calor, aire, bióxido de carbono y ácidos fuertes. Su punto de fusión es de 112.5 °C; punto de ebullición de 323.4 °C y una presión de vapor de 3.83×10^{-3} Pa. La solubilidad en el agua es de 2.57×10^{-2} mol/m³.

Usos: Desde 1950 dio inicio el uso masivo del lindano como insecticida agrícolas, pecuarios e inclusive de la salud humana para el combate de la pediculosis (Ávalos y Ramírez, 2003).



ANEXO III

En el siguiente cuadro se mencionan las características físicas y químicas de los plaguicidas:

Propiedades	Descripción
Solubilidad en agua	Los plaguicidas con solubilidad acuosa mayor a 500 mg/L son muy móviles en los suelos y otros elementos de los ecosistemas. Su mayor concentración se encuentra en los ecosistemas acuáticos. Los que tienen solubilidad mayor a 25 mg/L (organofosforados) no son persistentes en organismos vivos y los que tienen solubilidad menor (organoclorados) tienden a inmovilizarse en suelos y concentrarse en los seres vivos.
Coefficiente de partición lípido/agua	Este valor proporciona de manera indirecta información sobre la solubilidad y distribución de un plaguicida en un organismo vivo. Plaguicidas con un coeficiente mayor a uno (Aldrín y DDT) son liposolubles, se absorbe fácilmente a través de las membranas biológicas acumulándose en el tejido graso.
Presión de vapor	Los plaguicidas con presión de vapor mayor a 10^3 mm de Hg a 25 °C son muy volátiles, tienen gran movilidad y se dispersan hacia la atmósfera; los que tienen presiones de vapor entre 10^4 y 10^6 mm de Hg a 25 °C, son menos móviles y los no volátiles, que son más persistentes en suelos y agua, presentan presiones de vapor a 10^7 (herbicidas del grupo de triazinas).
Disociación e ionización	Las sustancias al solubilizarse pueden o no disociarse. Las que no se disocian son sustancias no iónicas sin carga y las que si lo hacen son iónicas y pueden tener carga positiva (catiónicas) o negativa (aniónicas). Los plaguicidas aniónicos (como fenoxiacéticos) y los no iónicos son móviles en los suelos, en tanto que los catiónicos se adsorben inmovilizándose en ellos (como el paraquat).
Degradabilidad	Esta propiedad (puede manifestarse por acción química de la luz o de microorganismos) informa sobre la posibilidad de que un plaguicida se descomponga y disminuya su actividad (por ejemplo: malatión, paratión y piretrinas).

(SEMARNAP- Serie 1, 1996).



ANEXO IV

Ventajas y limitaciones de la fitorremediación

Ventajas:

1. Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas.
2. Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.
3. Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

Limitaciones:

1. El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas.
2. Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
3. La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación.



ANEXO V

Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/81

Niveles máximos en mg L⁻¹

PARAMETRO	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola	Pecuario	Agua dulce	Agua Marina (aguas costeras)
γ-BHC o Lindano	0.003	-	-	-	0.002	0.0002
Aldrín	0.00003	0.00005	0.02	-	0.003	0.001
Dieldrín	0.0000007	0.000003	0.02	-	0.002	0.0007
Endrín Aldehído	0.001	0.000002	-	-	0.00002	0.00004
Heptacloro	0.0001	0.000002	0.02	-	0.0005	0.0005
Heptacloro Epóxido	0.0001	0.000002	0.02	-	0.0005	0.0005
Endosulfán I	0.07	-	-	-	0.0002	0.00003
pp-DDT	0.001	0.000005	-	-	0.001	0.0001
Endosulfán II	0.07	-	-	-	0.0002	0.00003
Dibutencilorendato	-	-	-	-	-	-
Metoxicloro	0.03	-	-	-	-	-

- = No especificado por el acuerdo

ANEXO VI

Cromatogramas

Figura 22. Cromatograma de la mezcla de referencia conteniendo los plaguicidas: Lindano, Heptacloro, Aldrin, Heptaclorohéxido, Endosulfán I, Dieldrin, Endosulfán II, Endrin aldehído, DDT, Dibutilen clorendato y Metoxicloro.

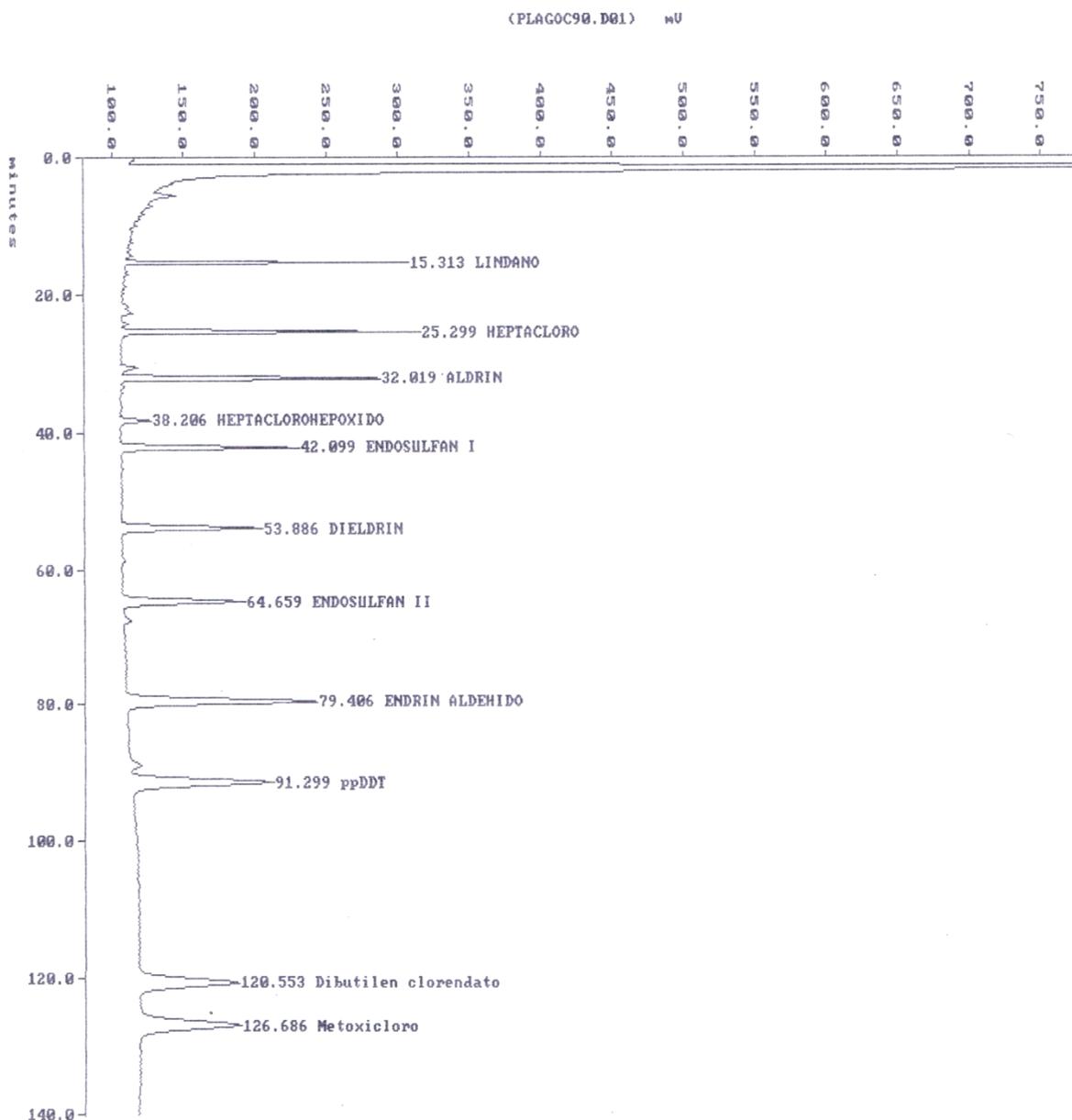




Figura 23. Cromatograma que corresponde a la muestra 4 (etapa aeróbica del humedal) efectuada en el mes de mayo

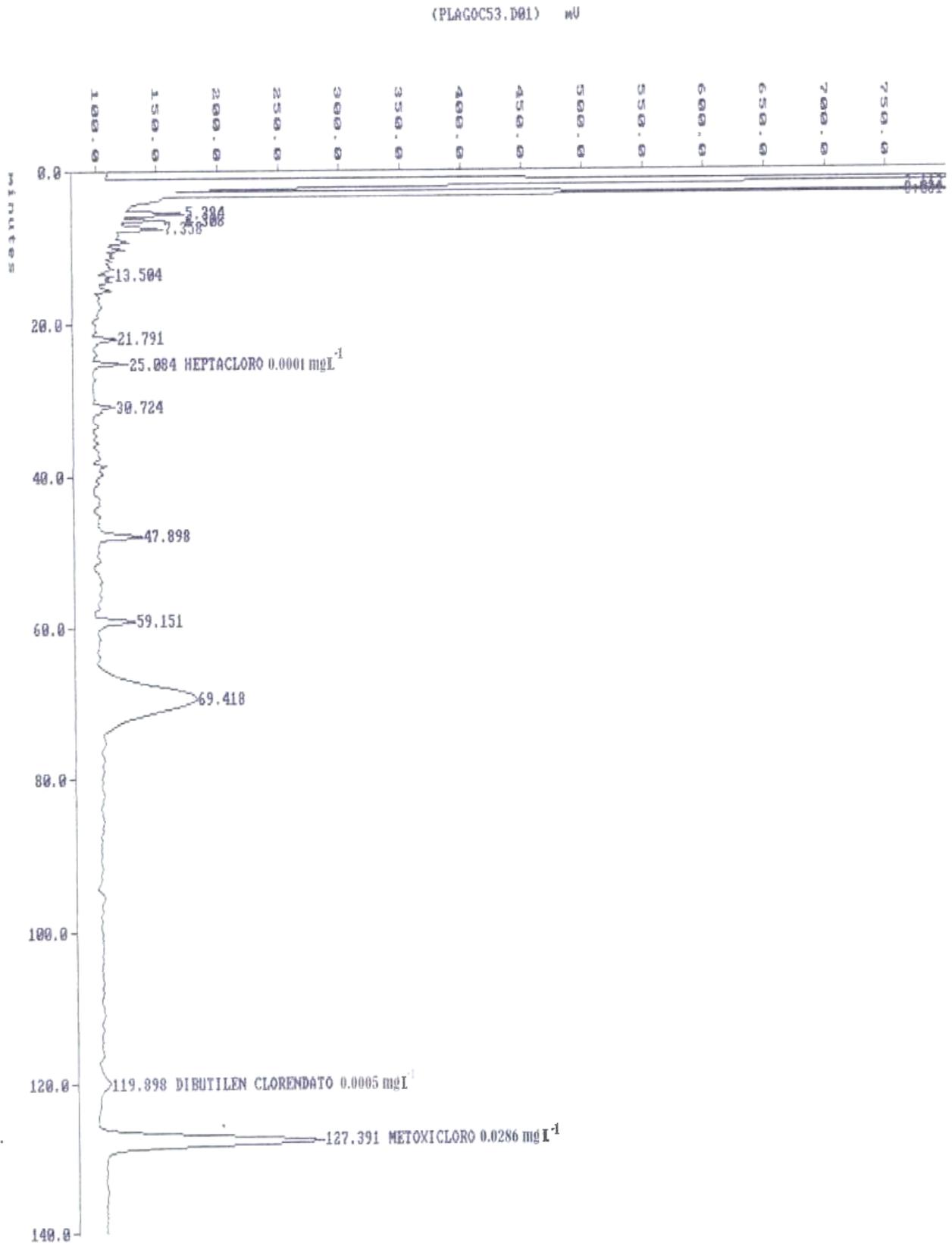


Figura 24. Cromatograma que corresponde a la muestra 6 (estanque V) efectuada en el mes de mayo.

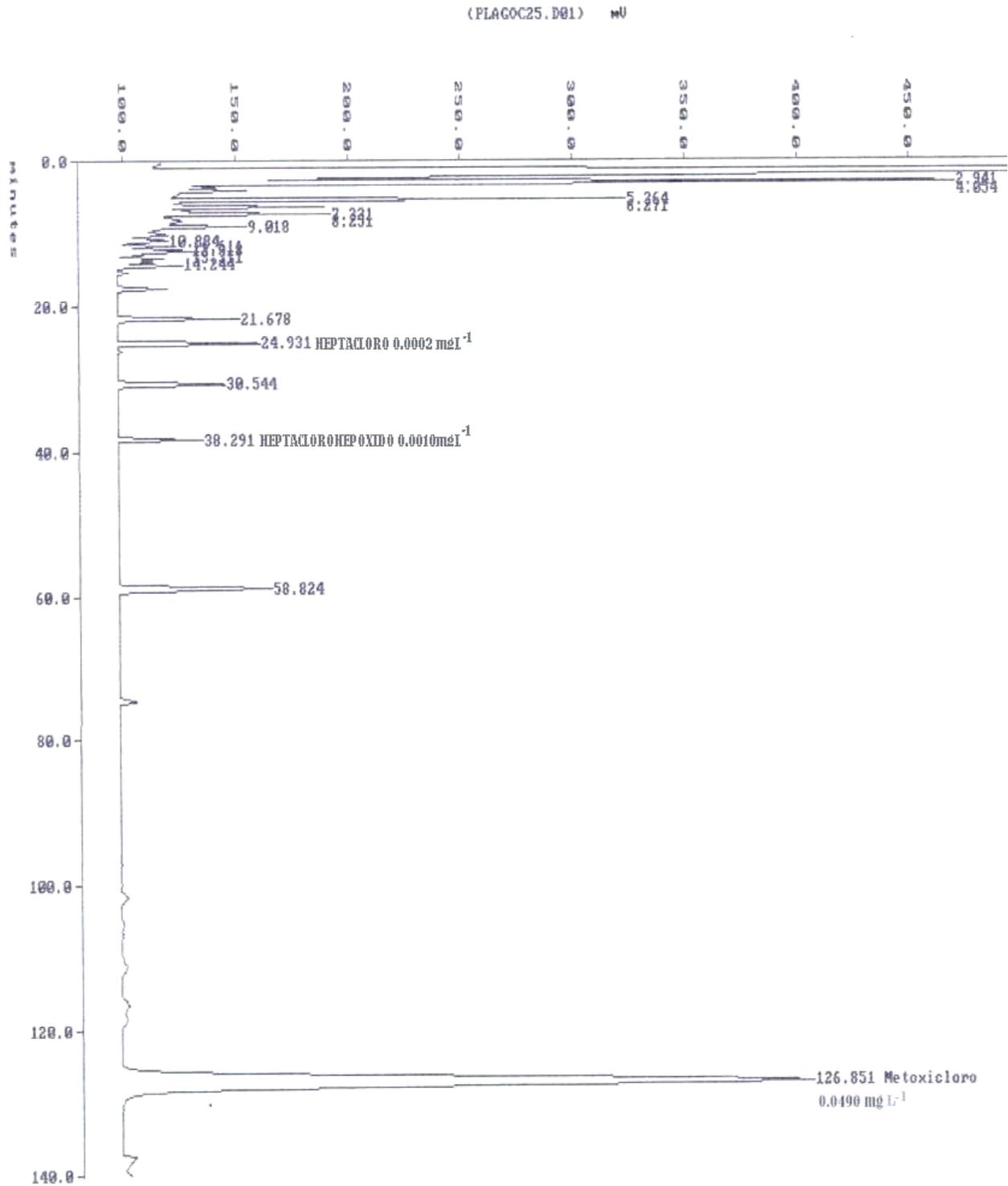




Figura 25. Cromatograma que corresponde a la muestra 7 (Estanque VI) efectuada en el mes de mayo.

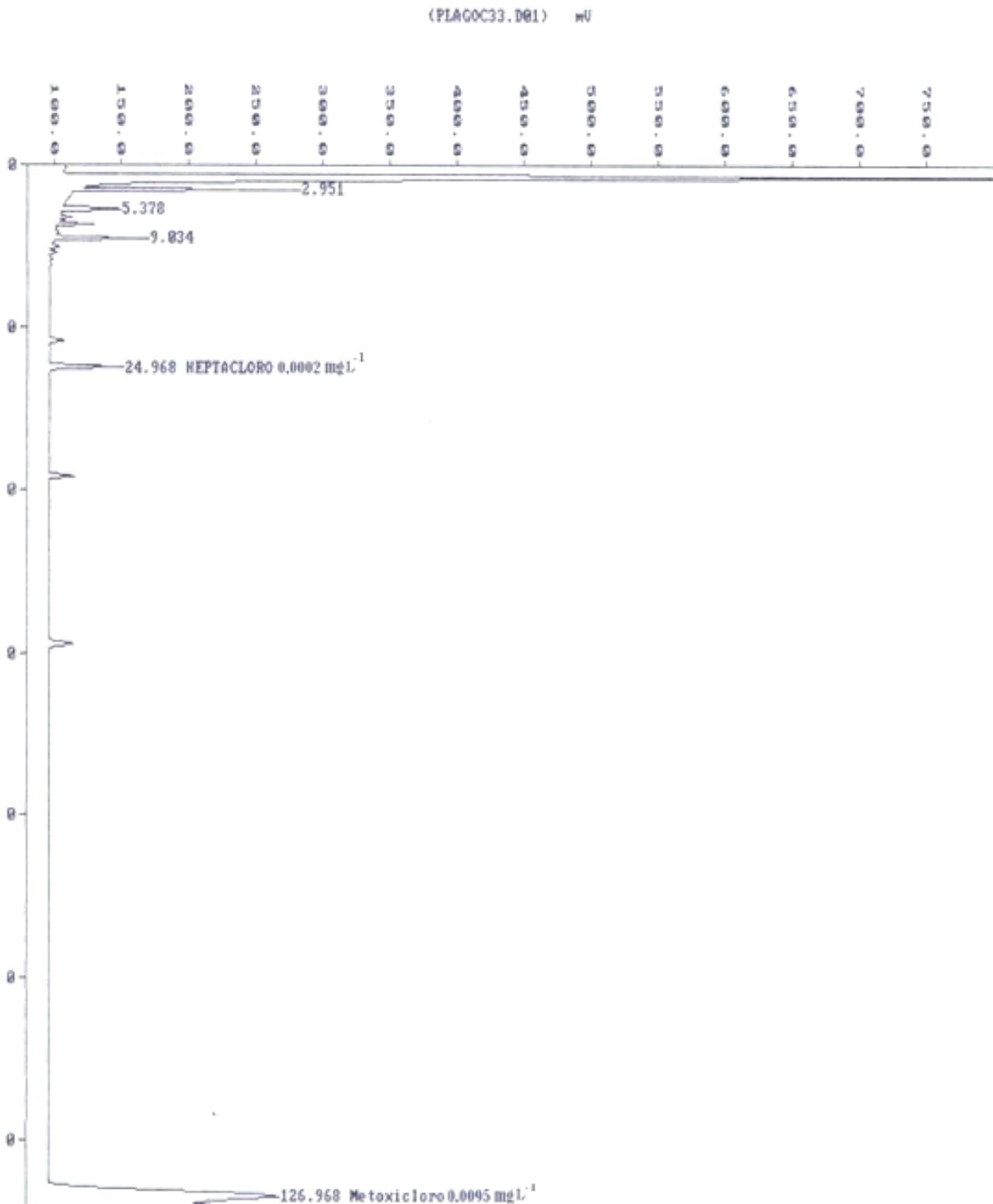




Figura 26. Cromatograma que corresponde a la muestra 5 (Estanque IV) efectuada en el mes de Octubre.

