



Caso experimental de remediación ex – situ en suelos contaminados por plaguicidas organoclorados, oxidación química y biosólidos.

Experimental case of ex-situ remediation in contaminated soils by organochlorines pesticides, chemical oxidation, and biosolids.

Dávila Sánchez, Rolando¹ ✉; Rodríguez, Ann¹

¹Fundación Universitaria Iberoamericana y la Universidad Europea Miguel de Cervantes.

Recibido: 04/10/2018
Aceptado: 22/07/2019

© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución-NonCommercial-CompartirIgual](#).

Resumen

El estudio evalúa el proceso de remediación en suelo de plaguicidas organoclorados, con elevadas concentraciones del contaminante Toxafeno. El diseño experimental constó de un bloque aleatorio, el que contemplaba seis unidades experimentales. Para su desarrollo se empleó la técnica de oxidación química ex – situ, utilizando peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y permanganato de potasio (KMnO₄), una unidad de bioremediación con biosólidos y una de control. Cuatro unidades experimentales fueron evaluadas con oxidante a dos concentraciones distintas: H₂O₂ al 10%, H₂O₂ al 20%, KMnO₄ al 10% y KMnO₄ al 20%. Mientras la celda de bioremediación se empleó una relación de biosólido de 1:1. El período de tratamiento total fue de tres meses, considerando la cantidad teórica de oxidante necesaria para la mineralización completa de los contaminantes. El muestreo de suelo fue realizado a un mes de culminada la fase de remediación, el que indica reducción de 92,6% y 95,3% en el tratamiento con Peróxido al 10 y 20%, mientras el permanganato reportó eficiencia de 95,7% y 99,6% respectivamente. El resultado para la muestra con biosólido presentó el mayor descenso con 99,7%; respecto a la concentración de Toxafeno en el control. Demuestra la efectividad que tiene el tratamiento biológico en la remediación de sitios contaminados con organoclorados, seguido muy de cerca por el uso de permanganato en este proceso.

Palabras clave: oxidación química, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio, biosólido, plaguicidas, toxafeno.

1. INTRODUCCIÓN

El auge del desarrollo humano ha dejado una fuerte presión sobre los recursos naturales, de los que extrae insumos para el abastecimiento de una población en aumento exponencial sin mitigar los impactos que esto conlleva. En particular, la demanda de alimentos para cubrir esta necesidad ha ocasionado severos daños ambientales en los recursos agua y suelo, desde la revolución verde con el uso intensivo de químicos en este rubro.

En Nicaragua el uso de plaguicidas a base de cloro como el Toxafeno y el DDT fueron ampliamente empleados en cultivos de algodón en la región del pacífico, estos forman parte del grupo de Compuestos Orgánicos Persistentes (COP) vetados en muchos países (Durán y Ladera 2010; Palma 2004; Calva y Torres 1998; ATSDR 1996). El resultado fue la contaminación de estos plaguicidas en diversos cuerpos de agua y en áreas agrícolas esparcidas en la región, pero aún desconocidas a cabalidad (Lacayo 2005; Calva y Torres 1998).

Los COP son moléculas muy estables, esencialmente no reactivas, que pueden ser utilizadas como herbicidas, pesticidas, fungicidas y como materia prima en la producción química (Lacayo 2005; PNUMA 1999; Calva y Torres 1998). En un inicio se identificaron 12 COP que son prioritarios para el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 1999), pero esta lista es más extensa en la actualidad. En el caso de las dioxinas y furanos no se producen de forma intencional, sino que son producto de procesos de incineración, o como sub-productos durante reacciones químicas (Lacayo 2005).

Los COP Se caracterizan por ser hidrofóbicos y lipofílicos, entre las propiedades físico-químicas que determinan el mecanismo de transporte y distribución en el medio ambiente (Lacayo, 2005 Lacayo,

✉ rdavilas@hotmail.de

Abstract

The study evaluate the remediation process in soil contaminated with organochlorine pesticides, which has high concentration of toxaphene. The experimental design was made with an aleatory set, composed of six independents units. For the remediation an ex – situ chemical oxidation was employed, with hydrogen peroxide (H₂O₂) and potassium permanganate (KMnO₄), one unit with bioremediation using bio-solid and one was for control. Four of this units were evaluated with each oxidant at two different concentrations, as follow: H₂O₂ 10%, H₂O₂ 20%, KMnO₄ 10% and KMnO₄ 20%. Meanwhile the bioremediation unit used a relation 1:1 with bio-solid. The treatment period was for three months, time which has been estimated for the completely mineralization of the contaminant from the theoretical oxidant demand. Soil samples were taken after a month of the last application, results show a reduction of the 92,6% and 95,3% with peroxide at 10 and 20% treatment, while the unit treated with permanganate reported a decrease of 95,7% and 99,6% respectively. A mayor reduction was obtained at bio-solid unit with 99,7% in comparison to the toxaphene concentration in the control. The biological treatment method showed more efficacy in the remediation of sites contaminated with organochlorine pesticides, followed very close for the permanganate in this process.

Keywords: Chemical oxidation, Hydrogen Peroxide, Potassium Permanganate, Bio-solid, Plaguicidas, Toxaphene.

2005; LaGrega et al 1996). Debido a su carácter lipofílico, los COP tienden a disolverse en lípidos y grasas, y lo hacen en menor proporción en agua. Esta cualidad los hace susceptibles a la biomagnificación en la cadena alimenticia, considerando además la resistencia de estos compuestos a la biodegradación (Lacayo 2005; Calva y Torres 1998). En general se desconoce sobre el destino de estos compuestos y de sus especies intermedias transformadas por la actividad biológica (Durán y Ladera, 2010, ATSDR 1996). El grado de mineralización que alcancen dependerá de los procesos bióticos y abióticos que ocurran en el suelo, como la hidrólisis, fotólisis y transformaciones por efecto de las raíces de las plantas y microorganismos (Durán y Ladera, 2010; Álvarez y Guevara 2003).

Algunos estudios han demostrado que la exposición continua al toxafeno puede causar toxicidad aguda a la vida acuática y terrestre, presentar riesgo carcinógeno y mutagénico al ser humano (Hooper et al., 1979; Reuber, 1979; Calciu et al., 1997; citado por Lacayo, 2005). No obstante, poca información está disponible sobre la cinética del toxafeno, sobre la mezcla química compleja que rige a los congéneres del toxafeno y la dificultad para cuantificar sus concentraciones en el ambiente (Lacayo 2005; ATSDR 1996); los efectos incluyen cancerígenos, toxicidad al sistema reproductivo, sistema nervioso e inmunológico, y efectos adversos al desarrollo.

En el ser humano la exposición a los COP es principalmente por el consumo de alimentos, aunque algunos de estos compuestos también pueden encontrarse en el agua (Durán y Ladera 2010; Lacayo 2005; ATSDR 1996). Entre estos compuestos, el toxafeno ha sido identificado en diversas fuentes de agua y suelos de Nicaragua (Lacayo 2005; Palma 2004). Desde estas fuentes pueden acumularse en la cadena trófica, ya

que son solubles en grasas, las mayores concentraciones se encuentran en la carne de pescado e incluso en ciertos granos básicos (Lacayo 2005; Palma 2004).

1.1. Técnicas de Remediación

En este contexto es relevante proponer alternativas de solución a esta problemática dada la repercusión hacia el medio ambiente e implicaciones en la salud humana, al considerar la movilidad y persistencia de estos compuestos (Lacayo 2005). La propuesta de experimentación de este estudio persigue ofrecer alternativas de remediación asequibles y costo-efectivas en el mediano plazo (USEPA 2006). Con el objeto de alcanzar la restauración de zonas afectadas a mayor escala.

1.1.1. Oxidación Química

El objetivo de la oxidación química, cuando es posible, es la transformación de especies contaminantes en especies que no son nocivas, o bien en especies intermedias inertes. Estas especies intermedias son menos peligrosas, y son susceptibles a procesos de atenuación microbiana (USEPA 2006).

Diversas técnicas de remediación se han desarrollado para dar respuesta a problemas de esta índole (Petri et al. 2011; Siegrist 2011; Durán y Ladera 2010; Regenesis 2007; USEPA 2006; Lacayo 2005; Álvarez y Guevara 2003; LaGrega et al. 1996; Brown y Norris 1994). En este estudio se discute la eficiencia de la oxidación química y la biorremediación para alcanzar la mineralización o la transformación en compuestos menos tóxicos de estos COP, así disminuir su disponibilidad y su impacto potencial en los suelos afectados.

La oxidación química comprende el aumento en el estado de oxidación de un compuesto mediante la transferencia de electrones. En los compuestos orgánicos ocurre por la reacción química con una sustancia oxidante, el mecanismo puede llevarse por la adición de oxígeno, remoción de hidrógeno y/o por la extracción de electrones con o sin extracción de protones. Este proceso se emplea para transformar a los contaminantes en sustancias que no son nocivas, o bien en especies intermedias inertes (Petri et al. 2011; Siegrist 2011; Regenesis 2007; USEPA 2006).

Para alcanzar este propósito existen diferentes especies químicas que pueden emplearse; sin embargo, en este estudio han sido objeto de comparación las más comunes: Permanganato (MnO_4^-) y Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2). La persistencia de cada oxidante en el medio es muy importante ya que determinará el tiempo de contacto y el transporte tanto advectivo como difusivo del oxidante (Regenesis 2007; USEPA 2006). En este caso, el permanganato persiste por mayor tiempo; mientras el H_2O_2 persiste por un menor tiempo (desde minutos a horas), lo que limita la distancia a la que puede ser transportado (USEPA, 2006). La cantidad de contaminantes que pueden ser tratados por la vía de oxidación es extensa, depende principalmente de la tasa de oxidación con cada oxidante. Es por ello que una gran cantidad de contaminantes son susceptibles a este proceso, entre ellos: hidrocarburos de petróleo, compuestos aromáticos volátiles, fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, etenos y etanos clorados, explosivos, plaguicidas, entre otros (USEPA, 2006).

1.1.2. Biorremediación

Se efectuó, a su vez, un ensayo con biosólidos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, para valorar el potencial que ofrece la biorremediación de los compuestos orgánicos persistentes (Álvarez y Guevara 2003; Durán y Ladera 2010). La biorremediación es un proceso en donde se utilizan microorganismos o las enzimas derivadas de ellos para retornar a un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural (Durán y Ladera 2010). La restauración es lograda por el metabolismo, el que usa el contaminante como fuente de energía en procesos de oxidación y reducción bacterianos (Durán y Ladera 2010; Lacayo 2005).

Esta técnica consiste en el proceso químico y microbiológico para la degradación de compuestos orgánicos persistentes, incluyendo entre ellos a los compuestos clorados. Destacan los mecanismos de reacción que conducen a la deshalogenación de los contaminantes en compuestos menos tóxicos: “la estimulación de secuencias metabólicas mediante la introducción de combinaciones de donadores y aceptadores de electro-

nes, adición de nutrientes para la estimulación de los microorganismos, posible uso de microorganismos modificados, y el uso de sistemas de enzimas” (Lacayo 2005).

El oxígeno es el aceptor final de electrones en los procesos de respiración microbianos bajo condiciones aerobias (Lacayo 2005; LaGrega 1996). Un amplio rango de microorganismos como el género *Pseudomona*, las cuales son el grupo más estudiado por su capacidad de degradar contaminantes (Lacayo 2005) son capaces de llevar a cabo la degradación de Compuestos Orgánicos Persistentes. Sin embargo, en muchos de los sitios de interés pueden encontrarse bajo condiciones anóxicas, como los acuíferos, estratos profundos del suelo y el sedimento acuático; los cuales representarían una desventaja para organismos aerobios (Álvarez y Guevara 2003).

Para el tratamiento de suelos contaminados, Durán y Ladera (2010) refieren que la “concentración mínima de organismos heterótrofos totales de 105 a 106 UFC/g”. En los casos que esta condición no sea cumplida, será necesario alcanzarla por vías alternativas como la adición de microorganismos inoculados (conocido como bioaumentación) o incrementar las poblaciones microbianas mediante la estimulación con nutrientes (o bioestimulación) (Durán y Ladera 2010).

En este sentido, los biosólidos poseen una gran capacidad para el desarrollo agrícola y forestal, en la recuperación de suelos degradados o como fuente de nutrientes, ya que poseen un alto porcentaje de materiales orgánicos (Durán y Ladera 2010; LaGrega 1996). Los biosólidos son producto de la estabilización de lodos orgánicos procedentes del tratamiento de aguas residuales, en la que se reduce su nivel de patogenicidad, poder de fermentación, y su atracción de vectores.

El uso de lodos biológicos posee múltiples ventajas, entre las que se cuenta el aporte de nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, y micronutrientes como níquel, zinc y cobre (Durán y Ladera, 2010). Sin embargo, también debería considerarse el aporte de microorganismos especializados en procesos de depuración que se encuentren presentes en los biosólidos, siempre que los mismos no sean patógenos, ya que representarían un riesgo para la salud humana y del medio ambiente.

2. MÉTODO

Se determinó la cantidad de oxidante necesaria para la completa oxidación de compuestos orgánicos organoclorados, con base al Oxígeno Activo de dos oxidantes (peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio) y una cantidad teórica de oxígeno necesario para este cometido (Regenesis 2007; USEPA 2006). El Oxígeno Activo (Tabla 1) determina el peso relativo de la fracción de oxígeno en cada oxidante que puede contribuir a la oxidación química, en caso de que la reacción resulte por esta vía (Regenesis, 2007).

Tabla 1. Porcentaje de oxígeno activo de ciertos oxidantes. Adaptado de Regenesis (2007).

Oxidante	Oxígeno Activo (%)
Peróxido de Hidrógeno	47.0
Permanganato de Potasio	15.2
Persulfato de Sodio	6.7

Los oxidantes fueron aplicados a dos concentraciones diferentes y así establecer la de mayor eficiencia en la degradación de los contaminantes según la estimación planteada (Tabla 2). En condiciones experimentales este cálculo teórico puede servir para dosificar la demanda de oxidante necesaria en el tratamiento de los compuestos organoclorados. Asimismo, para evaluar la factibilidad de llevar a cabo la remediación mediante la técnica de oxidación química con estos oxidantes (permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno) (Petri et al., 2011; USEPA, 2006).

El estudio se desarrolló en unidades experimentales que permitieron valorar la eficiencia de la oxidación química en la depuración de suelo impactado con organoclorados, además de compararlo con una unidad tratada con biosólidos. Se aplicó un diseño experimental en bloque aleatorizado, se pretendió que el bloque mostrara todos los tratamientos

Tabla 2. Estequiometría de Oxidación de Compuestos Orgánicos. Tomado de EPA (2004).

Petroleum Hydrocarbon	Oxidation Reaction	Oxygen Requirement (g O ₂ per g Contaminant)
MTBE	$C_5H_{12}O + 7.5 O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	2.7
Benzene	$C_6H_6 + 7.5 O_2 \rightarrow CO_2 + 3H_2O$	3.1
Toluene	$C_6H_5CH_3 + 9 O_2 \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O$	3.1
Ethylbenzene	$C_2H_5C_6H_5 + 10.5 O_2 \rightarrow 8CO_2 + 5H_2O$	3.2
Xylenes	$C_6H_4(CH_3)_2 + 10.5 O_2 \rightarrow 8CO_2 + 5H_2O$	3.2
Cumene	$C_6H_5C_3H_7 + 12O_2 \rightarrow 9 CO_2 + 6H_2O$	3.2
Naphthalene	$C_{10}H_8 + 12O_2 \rightarrow 10CO_2 + 4H_2O$	3.0
Fluorene	$C_{13}H_{10} + 15.5O_2 \rightarrow 13CO_2 + 5H_2O$	3.0
Phenanthrene	$C_{14}H_{10} + 16.5O_2 \rightarrow 14CO_2 + 5H_2O$	3.0
Hexane	$C_6H_{14} + 9.5 O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O$	3.5

objetos a valoración (Durán y Ladera, 2010). Debido a las características y limitaciones de la fase experimental, el arreglo del bloque fue efectuado en una sola unidad.

Se aplicó el proceso de remediación empleando seis unidades experimentales, en cada una se distribuyó un tipo de tratamiento. Las unidades experimentales se construyeron en pilas de concreto de 1m² y 30cm de profundidad, colocadas a la intemperie en las inmediaciones de la planta de tratamiento de suelos de la empresa Environmental Protection & Control (EPC) ubicada en San Benito en el km 33.5 de la carretera Panamericana Norte, en Managua, Nicaragua. Estas unidades trataban de simular las condiciones ambientales a las que estarían sometidas las muestras de suelo para los efectos de tratamiento.

El bloque experimental contaba con las siguientes unidades por tratamiento: una unidad de control, tratamiento con H₂O₂ al 10% de concentración, tratamiento con H₂O₂ al 20% de concentración, tratamiento con KMnO₄ al 10% de concentración, tratamiento con KMnO₄ al 20% de concentración, una unidad en relación porcentual 1:1 con biosólido.

2.1. Muestra

La muestra de suelo para las unidades experimentales fue extraída de un lote de suelo sujeto a remediación por parte de la empresa Environmental Protection & Control (EPC) en enero de 2014. El suelo proviene del Aeródromo Agrícola El Picacho del Departamento de Chinandega, municipio El Viejo; lugar de cargas, descargas y pruebas de bombeo de avionetas para la fumigación de cultivos décadas atrás.

El suelo dispuesto en las seis unidades experimentales para la aplicación de los tratamientos fue extraído de dicho lote, realizando en primer lugar la homogenización del mismo, para ser dispuestos en cada celda de concreto.

Se tomó una muestra de los biosólidos obtenidos de la planta de tratamiento de aguas, la cual fue enviada al Laboratorio de Microbiología de la Universidad Nacional Agraria, para recuento de Bacterias y Hongos. Las muestras de suelo tomadas para los análisis de compuestos organoclorados de línea base y de final del proceso fueron captadas usando el método de cuarteo por montón. En este método se toman muestras en los cuatro puntos límites de la superficie a muestrear más una muestra del centro, luego estas cinco muestras son homogenizadas obteniendo una muestra compuesta para los análisis a efectuar.

Las muestras fueron analizadas por el método de la US EPA 8081A para plaguicidas, también se efectuó el análisis US EPA 8141B para plaguicidas organofosforados en caso de que se detectaran concentraciones de los mismos. Las muestras fueron analizadas por el Laboratorio ACCUTEST Laboratories ubicado en Houston, Texas, en los Estados Unidos.

2.2. Cálculo de dosis de Oxidante

Se elaboró en una matriz para estimar la cantidad de oxidante necesaria para la degradación completa de los contaminantes presentes,

considerando la concentración inicial de contaminantes. En su diseño incorpora la siguiente información:

- Concentración de los oxidantes.
- Volumen de suelo a tratar.
- Densidad del suelo: para el presente estudio se tomó el valor de la densidad promedio del suelo, según los rangos más aceptados (LaGrega 1996).
- Demanda de oxígeno por gramo de contaminante: a partir de la Tabla 2 del presente estudio, se utilizó un valor de 4 para el objeto de experimentación. Se empleó este valor porque es superior a cualquier valor proporcionado por la EPA (2004), con lo cual se pretendía complementar la Demanda Natural de Oxidante del suelo y de esta forma garantizar la eficiencia del tratamiento.
- Dosis teórica de oxidante: se obtiene un volumen estimado de cada oxidante a una concentración determinada para la mineralización de los contaminantes.

El resumen de la Tabla 3 empleada para el diseño del experimento se muestra a continuación:

Tabla 3. Matriz empleada para el diseño del experimento.

Concentración total contaminante (ug/kg)	331 746
Volumen total a remediar (m ³)	0.14
Densidad promedio del suelo (Kg/m ³)	1950
Masa de contaminante a remediar (gr)	88.56
Demanda de O ₂ / 1gr de contaminante	4
grO ₂ /gr2H ₂ O ₂	0.47
grO ₂ /gr2KMnO ₄	0.2025
Cantidad de H ₂ O ₂ necesaria (grH ₂ O ₂)	753.69
Cantidad de KMnO ₄ necesaria (grKMnO ₄)	1 749.30

A partir de estos resultados se prepararon las soluciones de peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio al 10 y 20%, cada una respectivamente. El volumen total obtenido se dividió en aplicaciones semanales por un período total de tres meses.

Para las unidades 1 y 2 (control y con biosólido) sólo se aplicará aireación por volteo del suelo. Para las unidades con tratamiento de oxidante se aplicará igualmente la aireación por volteo más aplicación del oxidante, tratando de lograr el mayor contacto entre el suelo y el oxidante.

Culminada la etapa de experimentación con oxidante, se dio un período de 90 días para la toma de muestra y análisis de laboratorio. Las muestras fueron colectadas por cada unidad experimental usando la técnica de cuarteo por montón. Las muestras se tomaron en recipientes de vidrio de 8 onz y preservados a una temperatura <4°C según lo estipula el laboratorio.

2.3. Instrumentos de Medición y Técnicas

Una vez establecido el experimento se llevó a cabo el monitoreo diario de los parámetros físico-químicos de campo correspondientes a humedad y temperatura; los cuales fueron tomados dos veces por día, por la mañana y por la tarde. Estos parámetros fueron tomados con equipo de campo: termómetro y humidímetro. Para la medición de estos parámetros, se hizo la mesura en los cuatro extremos de la unidad experimental más una medición en el centro de la misma; las mediciones por parámetro eran promediadas y el resultado se consideraba el valor general para la celda de experimentación.

Para verificar los resultados del tratamiento, se colectaron muestras de suelo de cada unidad experimental a los 90 días de haber culminado la fase de aplicación de oxidante, a 180 días de haber iniciado el

Tabla 4. Resultados de análisis bacteriológico en muestra de biosólido.

Muestra	Bacterias identificadas	UFC/gr suelo	Hongos identificados	UFC/gr suelo
	<i>Pseudomonas sp</i>	2 x 10 ⁵		---
LA – PTCN	<i>Sarcina flava</i>	2 x 10 ⁵	Negativo	---
	<i>Bacillus sp</i>	5 x 10 ⁵		---

experimento. Las muestras se tomaron en este período para asegurarse de que el oxidante no continuará reaccionando en el medio, ya que en particular el permanganato tiene un tiempo de reacción prolongado. Las muestras fueron colectadas usando la técnica de cuarteo por montón, se homogenizaron y se enviaron al laboratorio para los análisis de plaguicidas organoclorados.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis Microbiológico

Se realizó el análisis del contenido de hongos y bacterias a una muestra de biosólidos usados en el experimento. La muestra fue codificada como LA – PTCN, procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales. El objetivo fue estimar la presencia de estos organismos en los biosólidos, y así evaluar su posible influencia durante el experimento. Los resultados se ilustran en la Tabla 4.

No se identificó la presencia de Hongos, pero si reportó la presencia de tres especies de bacterias en el orden de 105 Unidades Formadoras de Colonia por cada gramo de suelo, correspondientes a: *Pseudomonas* sp, *Sarcina flava*, y *Bacillus* sp. La cantidad de UFC en la muestra utilizada para el tratamiento cumple con la concentración mínima expuesta por Duran y Ladera (2010).

3.2. Concentraciones Iniciales de Plaguicidas Organoclorados

Los resultados iniciales para la muestra compuesta del lote de suelo contaminado con plaguicidas, en conjunto a los resultados finales por cada tratamiento, se presentan en la Tabla 6. La muestra fue tomada el 28 de agosto de 2013 por la empresa EPC y enviada a los Estados Unidos para los análisis. Estos resultados fueron tomados como representativos del lote de suelo bajo remediación, y fueron considerados para el experimento efectuado.

3.3. Parámetros Físicos

Los parámetros físicos monitoreados durante la etapa de experimentación fueron Temperatura y Humedad de cada unidad experimental. En la Tabla 3 se presenta el valor promedio obtenido durante la fase remediación del suelo.

La unidad con biosólido fue la única en presentar una media más cercana a la media de temperatura del control, puede estar asociado con la naturaleza del mismo y de su capacidad para retener humedad. Por otro lado, las unidades tratadas con oxidante en sus distintas concentraciones, no presentaron diferencias notables entre sus valores promedios ($\geq 1^\circ\text{C}$). Pero si fueron menores al valor promedio de la unidad de control ($> 1^\circ\text{C}$), el cual puede deberse a la reacción del oxidante.

A pesar de que la mayoría de los tratamientos con oxidantes presentaron un valor promedio de humedad superior al de la unidad de control, excepto por los tratamientos cuya concentración era del 20%, ninguno superó al promedio obtenido por la unidad con biosólidos. Una vez más, este hecho parece estar asociado con la naturaleza y composición de los biosólidos, coadyuvando a su vez los procesos biológicos, mientras los tratamientos con oxidantes son independientes de los mismos. Sin embargo, en todas las unidades experimentales, estos parámetros físicos monitoreados presentaron una tendencia similar durante el período de tratamiento.

3.4. Concentraciones Finales de Plaguicidas Organoclorados

Los resultados finales para las muestras compuestas obtenidas de cada unidad experimental objeto de estudio se presentan en la Tabla 6. Las muestras fueron tomadas el 07 de julio de 2014 por la empresa EPC y enviada a los Estados Unidos para los análisis.

Los resultados obtenidos en todas las unidades experimentales, muestran la no detección de los siguientes compuestos: Alfa clordano, gama clordano, dieldrín, Endrín aldehído, endosulfan II y etil paratión.

Todos estos compuestos desaparecieron en un 100% respecto de las concentraciones iniciales para todas las unidades experimentales.

Tabla 5. Valores promedios de los parámetros físicos monitoreados en cada unidad experimental.

Parámetro	Control	Biosólido	H ₂ O ₂ 10%	H ₂ O ₂ 20%	KMnO ₄ 10%	KMnO ₄ 20%
Temperatura (°C)	28.50	28.38	26.68	27.19	26.89	26.42
Humedad (%)	6.55	8.07	7.38	6.40	6.88	5.82

Tabla 6. Resultados finales de las muestras de suelo por cada unidad experimental.

Compuesto	Concentración Inicial	Control	Biosólido	H ₂ O ₂ 20%	H ₂ O ₂ 10%	KMnO ₄ 20%	KMnO ₄ 10%
	µg/Kg						
Alfa-Clordano	833	ND*	ND	ND	ND	ND	ND
Gama-Clordano	648	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Dieldrin	2,360	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4,4'-DDD	4,050	ND	5,680	ND	ND	ND	ND
4,4'-DDE	9,440	ND	ND	12,300	14,300	11,300	11,500
4,4'-DDT	61,100	ND	26,900	28,100	32,900	22,400	37,200
Endrín aldehído	5,160	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Endosulfan II	3,970	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Toxafeno	244,000	4,300,000	12,200	202,000	318,000	17,300	184,000
Etil Paratión	185	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*ND: No detectado

La "No Detección" de estos compuestos implica que los mismos pueden encontrarse en una concentración que es menor al MDL (Límite de Detección del Método, por sus siglas en inglés). El método empleado corresponde al EPA SW846 8081 A, y los límites de detección del método pueden variar desde 440µg/Kg para el alfa – clordano y 21,000 µg/Kg para el toxafeno.

La celda de control sólo reportó concentración de toxafeno, aunque este superaba el valor del muestreo inicial. La no detección de los otros compuestos registrados en el muestreo inicial puede deberse a factores como la atenuación natural y/o su volatilización por efecto de la aireación por volteo durante el período del experimento.

En el tratamiento efectuado con biosólidos se detectaron concentraciones de tres compuestos: 4,4'- DDD, 4,4'- DDT y toxafeno. El valor del 4,4'- DDT según los resultados de laboratorio disminuyeron en un 56% respecto a la línea base, empero la concentración de 4,4'- DDD se incrementó en un 40%. Este incremento en el 4,4'- DDD está asociado a la transformación del 4,4'- DDT del cual es un metabolito (Lacayo 2005). Sin embargo, no se reportó la presencia del 4,4'- DDE, el cual es otro metabolito de este compuesto organoclorado. La concentración de toxafeno experimentó una considerable reducción de hasta el 95% en esta unidad experimental.

Las unidades experimentales tratadas con peróxido de hidrógeno sólo reportaron concentraciones en tres compuestos durante el muestreo de control: 4,4'- DDE, 4,4'- DDT y Toxafeno. La concentración de 4,4'- DDE se incrementó en 51,5% y 30,3% para los tratamientos con H₂O₂ al 10% y 20%, respectivamente. En cambio el 4,4'- DDT disminuye su concentración en 46,2% y 54,0% para los mismos tratamientos. Sin embargo, los resultados en las concentraciones de toxafeno exhibieron un comportamiento contrario para ambos tratamientos, reportando un incremento del 30,3% para el tratamiento con H₂O₂ al 10%, mientras que la unidad con H₂O₂ al 20% disminuyó la concentración de este compuesto en un 17,2% respecto de las concentraciones iniciales.

Los resultados de laboratorio para las muestras tomadas de las unidades tratadas con permanganato de potasio reportaron valores para tres compuestos: 4,4'- DDE, 4,4'- DDT y Toxafeno. Al igual que en el caso del peróxido, los valores de 4,4'- DDE se incrementaron respecto de la línea base, en 21,8% para el tratamiento con KMnO₄ al 10% y en 19,7% para el tratamiento con KMnO₄ al 20%. Mientras la concentración de 4,4'- DDT disminuyó en 39,1% y 63,3% para los mismos tratamientos. La concentración de toxafeno fue menor que la inicial en ambos tratamientos de KMnO₄ con 24,6% de reducción en la celda con KMnO₄ al 10%, y con mayor eficiencia en la celda tratada con KMnO₄ al 20%, la que experimentó una reducción del 92,9%.

Para ninguna de las unidades experimentales se reportó la presencia de compuestos organofosforados, igual que en el muestreo inicial.

El porcentaje de reducción o aumento de los compuestos detectados durante el muestreo de control respecto de la concentración inicial de cada uno se ilustra en la Figura 1. Se ha obviado el resultado de la unidad de Control debido al comportamiento atípico presentado, los valores positivos se refieren al porcentaje de incremento y los valores negativos indican el grado de reducción respecto de la concentración inicial para los compuestos detectados.

Los resultados generales obtenidos indican que la unidad experimental que mayor eficiencia logró en la reducción de estos contaminantes fue

el tratamiento con biosólidos en proporción 1:1, seguido por la unidad tratada con Permanganato de Potasio al 20% de solución; ambas son capaces de lograr más del 80% de reducción por separado.

Las unidades tratadas con KMnO₄ al 10% y con H₂O₂ al 20% exhiben un comportamiento bastante similar en los resultados obtenidos, siendo más eficaz la primera con 29.9% de remoción, mientras la segunda sólo logró el 26.9%.

Únicamente la unidad experimental tratada con Peróxido de Hidrógeno al 10% presentó un efecto rebote en los compuestos detectados, los cuales superaron en casi todos los compuestos sus concentraciones iniciales.

4. DISCUSIÓN

4.1. Influencia de los Resultados Microbiológicos

Los resultados del análisis microbiológico muestran la presencia de tres géneros de bacteria, la concentración reportada para cada una en UFC/gr, se corresponde con el rango mínimo para esperar ocurra una biorremediación exitosa de 105, según lo enunciado por Durán y Ladera (2010). Las especies identificadas corresponden a *Pseudomonas* sp (2x10⁵), *Sarcina flava* (2x10⁵) y *Bacillus* sp (5x10⁵). De ellas, la especie más estudiada en procesos de remediación es la *Pseudomonas* sp (Lacayo, 2005), sin embargo, la presencia de los otros géneros pudo coadyuvar en los resultados obtenidos. Con lo cual se puede inferir que estas bacterias en conjunto presentan potencial para la remediación de suelos contaminados por compuestos organoclorados, logrando hasta un 95% de reducción.

La concentración de las bacterias también es un factor determinante, pudiendo lograr mayor eficiencia en la degradación de los compuestos organoclorados si se incrementan las cantidades de estas bacterias.

No se identificaron especies de hongos en la muestra, cuya influencia en la degradación de los compuestos organoclorados estudiados en este trabajo, debería ser investigada.

Adicionalmente, es considerable la fuente de nutrientes que representan los lodos para la estimulación de estas bacterias, como una garantía para la remediación del suelo contaminado. Esta fuente pudo haber hecho asequible y sostenible el metabolismo de los plaguicidas por parte de las bacterias, tal como lo reportaron Durán y Ladera (2010).

4.2. Parámetros Físicos

Los valores promedios obtenidos de temperatura y humedad en la unidad tratada con biosólidos parecen respaldar el incremento de la actividad biológica, superando a los valores de la celda control. Este hecho indica que los resultados de depuración alcanzados se deben efectivamente a la actividad de los microorganismos identificados.

En el caso de las unidades tratadas con peróxido de hidrógeno, no hubo el incremento de temperatura característico de la reacción exotérmica de descomposición de este químico. Esta ausencia está ligada a la concentración empleada, al ser diluida evita incrementos excesivos en la temperatura. Así mismo, se disminuye la cantidad de contaminante que es volatilizada por grandes aumentos de temperatura. Aunque este hecho podría coadyuvar a la reducción de las concentraciones de los compuestos organoclorados en el suelo, indica que los resultados obtenidos se deben completamente a procesos de oxidación química.

A pesar de que los resultados obtenidos en las unidades tratadas con

peróxido obtuvieron resultados generales dispares: incremento en las concentraciones con H₂O₂ al 10%, disminución con H₂O₂ al 20%, se puede inducir que dicho comportamiento se debe a factores producto de la oxidación (p.e. efecto rebote, resistencia al oxidante) y no tanto a cambios de estado (volatilización, desorción) (USEPA, 2006).

Por otro lado, las unidades tratadas con permanganato de potasio en solución sobresaturada, mostraron mayores valores de temperatura y humedad, la unidad tratada con una concentración de 10% sobre la que usó 20%. Este hecho puede deberse a que el volumen de la solución contribuye a mantener la humedad y a su vez difundirse de forma efectiva en el suelo. El permanganato no presenta una reacción exotérmica rápida ni potente como el peróxido de hidrógeno, por lo que su reacción es lenta y constante en el tiempo.

Esta situación podría ser explotada en futuros estudios utilizando una menor concentración de permanganato de potasio y mayores aplicaciones. Esta variante tiene el propósito de que las condiciones físicas no impidan el desarrollo de procesos biológicos que puedan favorecer la depuración de los compuestos organoclorados, mientras se lleva a cabo la degradación por oxidación química. De esta forma elevar la eficiencia en la remediación.

4.3 Concentraciones Finales de Plaguicidas Organoclorados

4.3.1 Unidad Control

Todos los compuestos detectados en el muestreo inicial desaparecieron en el muestreo final en la unidad de control, excepto el toxafeno, el cual sufrió un considerable incremento en su concentración. Los compuestos que se reportaron como No Detectados por el método de análisis son: Alfa – clordano, gama clordano, dieldrín, 4,4'- DDD, 4,4'-DDE, 4,4'-DDT, Endrín aldehído, endosulfan II y etil paratión. La posible causa referida para que la concentración de los mismos haya disminuido al nivel de no ser detectados es la degradación por atenuación natural y su volatilización por efecto de la aireación por volteo.

Debido a que no se cuenta con un análisis microbiológico inicial del suelo bajo experimentación, se desconocen las especies de bacterias u hongos que pudieran estar presentes, así mismo, si éstas presentan potencial para la biorremediación. Además, considerando el tiempo que tiene el suelo de estar contaminado por plaguicidas organoclorados, es posible asumir que el efecto de la atenuación natural por sí sola es mínimo en el tiempo que duró la experimentación (180 días hasta su muestreo final).

La volatilización por volteo, junto con la incorporación de oxígeno durante este proceso, puede ser la responsable en su mayoría por la reducción de los compuestos no detectados al final del experimento. La volatilidad pudo ser inducida por la acción mecánica del movimiento del suelo, misma que es una de sus características físicas más notables.

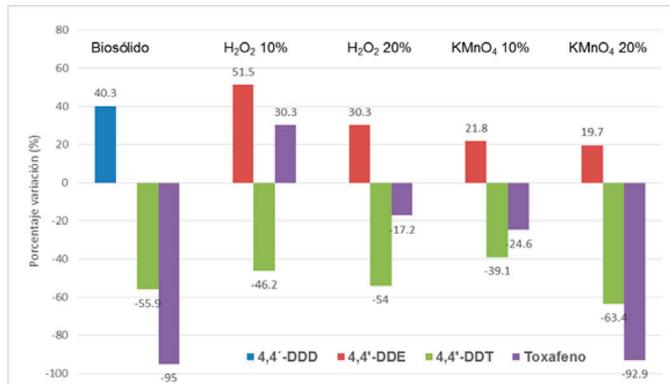
Por otro lado, el incremento en las concentraciones de toxafeno en esta unidad respecto de la línea base puede tener un efecto multicausal, tanto por su detección en el método de análisis, concentración de los compuestos utilizados o la variación en la concentración de sus congéneres (Lacayo, 2005). El toxafeno es el compuesto que mayor concentración presenta en el muestreo inicial, y a su vez es uno de los COP más recalcitrante.

Estos resultados únicos de la celda control en comparación con las otras unidades experimentales, comparten algunos símiles que brindan una posible explicación al proceso. Por ejemplo, en todas las unidades no se reportó concentraciones de Alfa – clordano, gama clordano, dieldrín, Endrín aldehído, endosulfan II y etil paratión; lo que indica que el 4,4'-DDT y sus metabolitos (4,4'-DDE y 4,4'-DDD) experimentaron otro mecanismo de reacción diferente al de la unidad control. El aumento detectado en la concentración de toxafeno es un indicio de la perseverancia de este compuesto, también de la posibilidad de que su concentración total fuera superior a la reportada en el muestreo inicial, lo que necesitaría mayores medidas para su depuración.

4.3.2 Biosólidos

Los resultados obtenidos en la unidad tratada con biosólidos mostraron la eficiencia general más alta en la degradación de los contaminantes. Puede deberse a la capacidad que presenta el biosólido para estabilizar el suelo afectado y proporcionar los nutrientes necesarios para autoestimular a los microorganismos y que estos puedan degradar a los contaminantes. Es remarcable la presencia de las bacterias en una

Figura 1. Porcentaje de variación de los compuestos detectados en las unidades experimentales según los compuestos detectados.



concentración adecuada para llevar a cabo la biorremediación, la cual fue efectuada por los géneros identificados: *Pseudomonas* sp, *Sarcina flava* y *Bacillus* sp.

Dentro de los contaminantes reportados en el muestreo final se encuentra el 4,4'-DDT, el cual disminuyó en un 55.9% respecto de la concentración inicial. La biorremediación de este contaminante es asequible y se ha comprobado como efectiva con base a estos resultados. Sin embargo, se reportó el incremento de uno de sus metabolitos, el 4,4'-DDD en un 40.3%, el cual es uno de los subproductos de la degradación del DDT. Empero, mayores disminuciones podrían alcanzarse aún por esta vía, si se crean las condiciones para mejorar la actividad microbiológica.

Es posible que tanto el 4,4'-DDT como el 4,4'-DDD no hayan podido volatilizarse de esta unidad experimental, a como sucedió en el control, por haber formado enlaces más fuertes con los materiales que componen al biosólido (mayor contenido de materia orgánica, nutrientes, iones, etc.). La disminución de la concentración del toxafeno, en un 95%, muestra la eficiencia en la mineralización por la biorremediación aeróbica. La actividad de las bacterias identificadas en los biosólidos y en la concentración obtenida es suficiente para alcanzar este resultado. Se podría alcanzar mayor eficiencia en la degradación de los contaminantes si se optimizaran ciertas condiciones como la concentración de estos microorganismos o si se estimularan externamente mediante nutrientes para incrementar la cantidad de contaminante metabolizado.

4.3.3. Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂)

Las unidades tratadas con peróxido de hidrógeno presentaron comportamiento dicotómico en sus eficiencias generales, positivo para el H₂O₂ al 20% y negativo para el H₂O₂ al 10%. Sin embargo, en ambas celdas tratadas con este oxidante se logró la degradación del 4,4'-DDT, con una eficiencia bastante similar, lo que parece indicar la tratabilidad con este oxidante.

De igual forma se encontró el incremento de uno de los metabolitos del DDT, el 4,4'-DDE, lo que era un efecto a esperar como subproducto de la oxidación. Aunque este incremento fue más acentuado en el tratamiento con peróxido al 10%, asociado a la disminución de la reacción con el oxidante debido a su concentración.

La misma unidad experimental reportó incremento en la concentración de Toxafeno, efecto que puede deberse a la desorción del contaminante y producto de su baja reactividad con el peróxido, fenómeno que debería estudiarse. En el caso de la unidad tratada con mayor concentración de peróxido, se produjo una leve disminución en la concentración de toxafeno (17.2%), la que puede deberse a la concentración empleada, en la que pudo romper los enlaces y reaccionar lo suficiente para alcanzar esta leve degradación.

La reactividad del peróxido de hidrógeno con los compuestos organoclorados no ha sido evaluada a plenitud. Empero, según la EPA (2006) incluso el uso de reactivo Fenton con sus diferentes radicales de mayor potencial RedOx que el H₂O₂ por sí solo, tiene una eficiencia baja a media en la degradación de plaguicidas.

Adicionalmente, es posible que la composición del suelo bajo experimentación hubiera interferido en la eficiencia de la oxidación con peróxido. El contenido de materia orgánica y de otras especies inorgánicas puede consumir cantidades importantes de oxidante, restando cantidad del mismo disponible para reaccionar con el contaminante de interés. Aunque es posible lograr resultados limitados con el uso de este oxidante, o elevar su eficiencia en la degradación optimizando su uso.

4.3.4. Permanganato de Potasio (KMnO₄)

Las unidades que fueron tratadas con permanganato de potasio presentaron las mayores reducciones entre los oxidantes a valorar. La eficiencia se incrementó al emplear mayor concentración de oxidante en más del doble; la eficiencia general con permanganato al 10% fue del 29.9% y se incrementó hasta el 84.6% en la unidad tratada al 20% de solución de permanganato.

En ambas unidades experimentales se logró la degradación del 4,4'-DDT, con mayor eficiencia en el tratamiento concentrado (KMnO₄ al 20%), esto sugiere la susceptibilidad del contaminante a ser degradado por este oxidante. Al igual que en otras celdas experimentales se registró el incremento de uno de los metabolitos del DDT, el 4,4'-DDE, lo que era un efecto a esperar como subproducto de la oxidación. El incremento fue

más acentuado en el tratamiento con permanganato al 10%, sin embargo, el rebote en las concentraciones fueron las menores registradas en todas las unidades experimentales, incluso en la de biosólidos comparando metabolitos del DDT.

La unidad tratada con permanganato al 20% fue la que reportó el menor rebote de metabolitos del DDT. Este resultado indica que el oxidante tuvo alta persistencia y reactividad, ya que actuó incluso sobre el subproducto, induciendo a una menor concentración residual. Cabe destacar que según la EPA (2006) el uso de permanganato tiene "buena" posibilidad de oxidar a los plaguicidas, lo que explica la alta eficiencia registrada en los resultados.

Este hecho también es notable en los resultados de toxafeno al final del período de experimentación, en el que se obtuvo hasta un 92.9% de reducción en la unidad tratada con permanganato al 20%. A pesar de la dificultad en la degradación del contaminante, el resultado obtenido es satisfactorio, pudiendo incrementar su eficiencia si se ajusta el proceso.

Al igual que con el peróxido de hidrógeno, es posible que la composición del suelo bajo experimentación hubiera interferido en la eficiencia de la oxidación con permanganato. El permanganato es uno de los oxidantes que mayor demanda natural posee (EPA 2004), razón por la cual el valor teórico de 4gr de O₂/gr contaminante pudo ser insuficiente para satisfacer dicha demanda. En este caso, la limitante se debe enteramente al consumo del oxidante por especies presentes en el suelo de forma natural, y no tanto a la reactividad del oxidante con los contaminantes de interés, como ocurrió con las unidades tratadas con peróxido de hidrógeno.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de la unidad Control indican la posibilidad de eliminar los compuestos organoclorados: Alfa – clordano, gama clordano, dieldrín, 4,4'-DDD, 4,4'-DDE, 4,4'-DDT, Endrín aldehído, endosulfan II y etil paratión; mediante la aireación por volteo mecánico del suelo.

Las características microbiológicas de la muestra de biosólidos empleada para la experimentación como el contenido y géneros de las bacterias identificadas (*Pseudomonas* sp., *Sarcina flava*, *Bacillus* sp.) hacen posible la biorremediación del suelo contaminado por plaguicidas organoclorados con alta eficiencia. Ésta unidad tratada presentó la mayor eficiencia general en la degradación de los organoclorados con un 86.5%, característica de los procesos aeróbicos. Sin embargo, esta eficiencia aún podría elevarse si se estimulan condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos.

El Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂) a pesar de su comportamiento dicotómico en las concentraciones empleadas para la experimentación, aún es posible emplearlo para el tratamiento de los plaguicidas en una etapa primaria. El bajo costo y persistencia de este oxidante hace factible aplicarlo de forma continua, en mayor volumen y en mayores concentraciones, considerando que la más alta eficiencia se alcanzó a una concentración del 20%. Para compensar la baja reactividad de este oxidante con este tipo de contaminantes, es necesario conocer los tipos y concentraciones de especies orgánicas e inorgánicas que pueden consumirlo. También sería conveniente valorar el uso de Hierro Ferroso como catalizador del Peróxido de Hidrógeno para producir la reacción Fenton, el cual ofrece una gama de radicales con mayor potencial tanto para la oxidación como para la reducción de los contaminantes.

El permanganato de potasio (KMnO₄) fue el oxidante que mayor eficiencia general presentó con 84.6%, superado levemente por el biosólido. Es posible que la mineralización completa de los contaminantes no se haya alcanzado debido a la interferencia de la demanda natural de oxidante.

Entre los oxidantes valorados en este estudio, el Peróxido de Hidrógeno (aún en la mayor concentración) presentó baja eficiencia en el tratamiento de los contaminantes organoclorados. Mientras el Permanganato de Potasio presentó alta eficiencia en la degradación de estos compuestos. La eficiencia de los oxidantes podría incrementarse si se consideran aspectos como la demanda natural de oxidante, contenido de materia orgánica y concentraciones de especies reducidas que consumen oxidante. Estos datos podrían ser incluidos en el cálculo teórico realizado en este estudio para elevar la tasa de degradación de los contaminantes organoclorados mediante la oxidación química.

El uso de biosólidos mostró ser ligeramente superior que la oxidación con permanganato en el tratamiento de plaguicidas. A pesar de que ambas técnicas pueden mejorar sus eficiencias, otras variables tendrían que ser

consideradas, como la manipulación del período de tratamiento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece de forma especial a Environmental Protection and Control S.A. (EPC) por el apoyo brindado en el desarrollo de este estudio, en particular a María Elena López. A todo el personal de la Planta de Remediación de Suelos "San Benito" de EPC. El presente estudio fue posible gracias al programa de la Fundación Universitaria Iberoamericana (FUNIBER) y a la Universidad Europea Miguel de Cervantes.

REFERENCIAS

- Agency for Toxic Substances & Disease Registry, ATSDR, (1996). *Toxaphene, Summary of public health*. http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs94.html. Consultado el 26/05/2014.
- Álvarez, P. y Guevara, E. (2003). *Biorremediación y Atenuación Natural de Acuíferos Contaminados por Sustancias Químicas Peligrosas*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC), Valencia, Estado Carabobo.
- Brown, R. A. and R. D. Norris. (1994). *The Evolution of a Technology: Hydrogen Peroxide in In-situ Bioremediation. In Situ Hydrocarbon Bioremediation*. Hinchee, R.E. Ed., CRC Press, Boca Raton.
- Calva, L. y Torres, M., (1998). *Plaguicidas Organoclorados. Laboratorio de Ecosistemas Costeros*. <http://www.izt.uam.mx/contactos/n30ne/pdf/plaga.pdf>. Consultado el 17/06/2014.
- Durán, L. & Ladera, M. (2010). *Biorremediación de suelos contaminados por organoclorados mediante la estimulación de microorganismos autóctonos, utilizando biosólidos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente, CIEMA – UNI. Managua, Nicaragua.
- Global Environment Facility, GEF y United Nations Development Programme PNUD (s/f). *Proyecto Mejoramiento del Manejo y de la Contención de la Liberación de Pesticidas COPs en Nicaragua*.
- Lacayo, M. (2005). *Microbial Degradation of Toxaphene*. Tesis doctoral. Departamento de Biotecnología, Universidad de Lund, Suecia.
- LaGrega, M., Buckingham, P. & Evans, J. (1996). *Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos*.
- Palma R. (2004). *Plaguicidas peligrosos en Nicaragua*. Ministerio Agropecuario y Forestal. Managua, Nicaragua.
- Petri, Benjamin G., Watts, Richard J., Teel, Amy L., y Huling, Scott G. (2011). *Fundamental of ISCO using Hydrogen Peroxide*. En R.L. Siegrist, M. Crimi y T.J. Simpkin (Edts), *In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, United States.
- Petri, Benjamin G., Thomson, Neil R., y Urynowicz, Michael A. (2011). *Fundamental of ISCO using Permanganato*. En R.L. Siegrist, M. Crimi y T.J. Simpkin (Edts), *In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, United States.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), (1999). Comité Intergubernamental de negociación de un *Instrumento Internacional jurídicamente vinculante para la Aplicación del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado previo a ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional*. <http://www.pic.int/incs/inc6/6f/Spanish/6-A6S.PDF>.
- Regenesis. (2007). *Principles of Chemical Oxidation Technology for the Remediation of Groundwater and Soil. RegenOxDesign and Application Manual*.
- Siegrist, Robert L., et al. (2001). *Principles and Practices of In-situ Chemical Oxidation Using Permanganate*. Battelle Press.
- Siegrist, Robert L., Crimi M., y Brown, Richard. (2011). *In Situ Chemical Oxidation: Technology Description and Status*. En R.L. Siegrist, M. Crimi y T.J. Simpkin (Edts), *In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, United States.
- United States Environmental Protection Agency EPA/600/R-06/72 (2006). *In – Situ Chemical Oxidation, Engineering Issue*.
- United States Environmental Protection Agency EPA/600/R-06/72 (2006). *How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites, Chapter XIII Chemical Oxidation*.

Vicente, F., Romero, A., Santos, A. (s/f) *Aplicación de Agua Oxigenada para la Remediación de Suelos Contaminados*. Universidad Complutense de Madrid, Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación.