

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Reconstrucción de la deposición atmosférica histórica de DDT en la laguna de Zempoala en el centro de México.
<i>Autor / Adscripción</i>	Manfred van Afferden Anne M. Hansen Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Christopher C. Fuller US Geological Survey
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 20(3): 71-83
<i>Fecha de publicación</i>	2005
<i>Resumen</i>	Se reconstruyó la historia de deposición de DDT y sus metabolitos en la laguna de Zempoala, en el centro de México, mediante el análisis de núcleos de sedimentos. La cuenca de esta laguna alpina no está afectada por actividades agrícolas ni por poblaciones permanentes. Los resultados indican también que la laguna de Zempoala representa un depósito natural, adecuado para estudios de reconstrucción del historial de deposición de contaminantes provenientes de la atmósfera en esta región. También se demuestran las limitaciones de la metodología aplicada.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/799

Reconstrucción de la deposición atmosférica histórica de DDT en la laguna de Zempoala en el centro de México

Manfred van Afferden
Anne M. Hansen

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Christopher C. Fuller

US Geological Survey

Se reconstruyó la historia de deposición de DDT y sus metabolitos en la laguna de Zempoala, en el centro de México, mediante el análisis de núcleos de sedimentos. La cuenca de esta laguna alpina es cerrada, pequeña, y se localiza entre 2,800 y 3,700 msnm. No está afectada por actividades agrícolas ni por poblaciones permanentes. La laguna de Zempoala tiene una profundidad promedio de 3.9 m y máxima de 8.8 m. Se extrajeron sedimentos con nucleador y fueron analizados por métodos isotópicos (^{137}Cs y ^{210}Pb) para su fechado. Los resultados obtenidos con estos métodos indican una tasa promedio de sedimentación de $0.129 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ y sesenta años de edad a 44 cm de profundidad. La primera presencia de DDT-total corresponde a los años sesenta y la máxima concentración ($13 \mu\text{g kg}^{-1}$) ocurre a finales de los setenta, principios de los ochenta; posteriormente, decrece a $1.6 \mu\text{g kg}^{-1}$. Tal concentración está por debajo de la mayoría de los niveles de DDT-total reportados en estudios realizados en los Estados Unidos de América. Los resultados indican también que la laguna de Zempoala representa un depósito natural, adecuado para estudios de reconstrucción del historial de deposición de contaminantes provenientes de la atmósfera en esta región. Se demuestran las limitaciones de la metodología aplicada debidas a la influencia de la biodegradación en la determinación de las concentraciones de deposiciones históricas de DDT.

Palabras clave: DDT, sedimentos, núcleos, deposición, fechado, ^{137}Cs , ^{210}Pb .

Introducción

La introducción generalizada del uso de DDT [1,...1,...1-tricloro-2,...2-bis-(4'-clorofenil)etano] en México ha seguido un patrón similar al de muchos países. Desde los años cincuenta se utilizó DDT para control de vectores en áreas endémicas, principalmente en zonas tropicales (Casas *et al.*, 1998). La cantidad de DDT que se utilizó en México para el control de vectores, principalmente, en un periodo de 43 años, llegó a aproximadamente 73,000 toneladas. Los periodos de 1957 a 1960, y de 1970 a

1975 constituyen los lapsos de aplicaciones más altas en el país, con un promedio de más de 3,000 toneladas por año. A partir de 1990, debido a la implementación del Plan de Acciones Integradas Simultáneas, se redujo la cantidad de DDT aplicado continuamente y en 2000 se eliminó por completo su uso para control de hiperendemias (SSA, 2000; Ferretti, 2004; CCAAN, 2004a; Caballero-Ramírez, 2002).

Sin embargo, además de haber sido empleado para controlar vectores de enfermedades parasitarias, el DDT se usó para controlar plagas agrícolas, especialmente

en cultivos de algodón. A principios de los cincuenta, el DDT comenzó a utilizarse en el campo y para fines de los sesenta, principios de los setenta, su uso ya era intensivo (CCAAN, 2004b). Aunque no existen datos históricos de la cantidad de DDT que se ha usado en el sector agrícola, la producción nacional de DDT tanto para uso en el país como para la exportación está calculada en aproximadamente 25 mil toneladas anuales para el periodo de uso intensivo anteriormente mencionado (SSA, 2000).

El DDT se encuentra dentro del grupo de doce contaminantes orgánicos persistentes (COP), los cuales están incluidos en el Convenio de Estocolmo como sustancias prioritarias para su futura reducción y final eliminación de uso en todo el mundo (UNEP, 2001). Los COP se caracterizan por su persistencia en ecosistemas, potencial de bioacumulación y riesgo de poseer efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. Pueden persistir durante décadas en el suelo, asociados con materia orgánica y partículas de arcilla; son transportados grandes distancias a través del ciclo hidrológico y la atmósfera. Por eso los COP se han distribuido globalmente y han sido detectados en lugares donde nunca fueron utilizados, tan alejados como la capa de hielo del polo norte (Jensen *et al.*, 1997).

La comparación de concentraciones actuales con niveles anteriores de contaminación es uno de los criterios para implementar programas ambientales para la reducción de emisiones de los COP. Sin embargo, no existen programas de monitoreo de estas sustancias que cubran los últimos 60 a 80 años (desde la industrialización). Otra forma de obtener la cronología de la contaminación es examinando núcleos de sedimentos en cuerpos de agua receptores tales como lagos, deltas de ríos u otros reservorios.

La naturaleza de los procesos de sedimentación permite recurrir a la interpretación de los núcleos de sedimentos para conocer las condiciones históricas de calidad del agua y de la deposición de los COP. Los suelos superficiales son transportados vía agua y atmósfera hacia los lagos, en cuyo fondo se depositan. Cuando este sedimento no ha sido perturbado, constituye un registro de la edad de los sedimentos, así como de los procesos químicos y biológicos. Cuanto más profundo, el sedimento es más antiguo, y bajo condiciones "ideales", es decir, con una tasa constante de sedimentación, la profundidad es directamente proporcional a la edad. Mediante análisis isotópicos es posible reconstruir la edad de capas específicas de perfiles de sedimentos y comparar diferentes épocas. Los métodos de ^{137}Cs y ^{210}Pb son los más comúnmente

usados para medir la velocidad de sedimentación durante los últimos 100 a 150 años. Ambos radioisótopos son buenas herramientas para fechado, porque se conocen sus propiedades físicas y químicas, sus vidas medias son apropiadas para calcular este intervalo de tiempo, la actividad inicial es conocida o puede estimarse con exactitud y ambos son relativamente fáciles de medir (Geyh y Schleicher, 1990; Clark y Fritz, 1997).

Para obtener núcleos no perturbados que cumplan con las condiciones de fechado, una tasa constante de sedimentación y material fino con alta capacidad de adsorber contaminantes y marcadores, se recomienda tomar las muestras en zonas lacustres, caracterizadas por una lenta y constante sedimentación (Thornton, 1990; Callender y Van Metre, 1997).

El presente trabajo tiene como objetivo reconstruir el historial de deposición de DDT y sus metabolitos en un área remota, es decir, lejos de lugares de aplicación de plaguicidas organoclorados, para obtener una indicación de las concentraciones de fondo de DDT-total como resultado del transporte atmosférico.

Laguna de Zempoala

Los principales criterios para la selección de un cuerpo de agua, cuyos sedimentos registran sólo la deposición atmosférica de DDT-total, son el tamaño de la cuenca, la afectación por actividades humanas y la profundidad del agua. Un lago dentro de una microcuenca cerrada, lejos de zonas agrícolas y de asentamientos humanos, con suficiente profundidad, de manera que la perturbación de sedimentos sea escasa, constituiría un lago prometedor. El criterio de la distancia puede entenderse ya sea por la altitud (lagos alpinos) como por la lejanía horizontal.

Se seleccionó la laguna de Zempoala para este estudio debido a su localización dentro de un parque nacional. La laguna se encuentra en los 19°03' de latitud norte y 99°18' de longitud oeste, poco afectado por actividades humanas, como agropecuarias, deportes acuáticos y construcciones. La vegetación en la cuenca consiste en bosques naturales de pino (*Pinus sp.*), oyamel (*Abies sp.*) y encino (*Quercus sp.*), con áreas de pastizal pantanoso.

El parque está conformado por varias cuencas cerradas, con altitudes que van desde 2,400 a 2,800 msnm, en las que se encuentran las lagunas de Zempoala, Compila, Tonatiahua, Seca y Prieta, así como la Joya de Texcapa. Estas lagunas están rodeadas por montañas con altitudes de entre 2,800 y 4,000 msnm (Vargas-Márquez, 1984). La cuenca de la laguna de Zempoala tiene un área de 6.7 km² y la laguna tiene una superficie de aproximadamente 11.5 ha. Se ubica

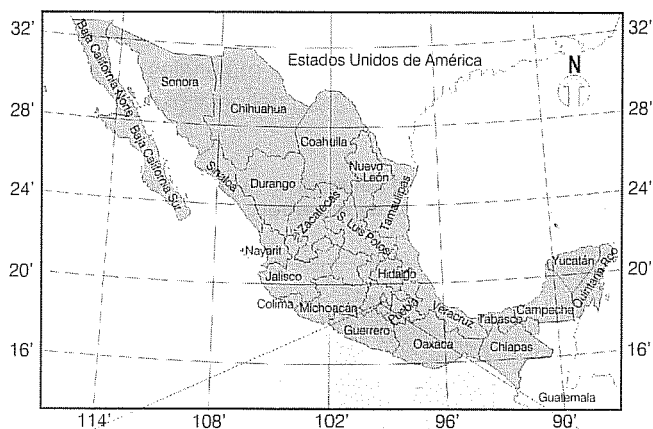
en el centro del país, en estado de Morelos, a 20 km en línea directa de la ciudad de Cuernavaca ($\approx 0.6 \cdot 10^6$ habitantes, 1,500 msnm), y a 40 km de la ciudad de México ($\approx 20 \cdot 10^6$ habitantes, 2,100 msnm). Los poblados en los alrededores son Huitzilac y Tres Marías (<5,000 habitantes). Las principales actividades económicas en la zona circundante son agricultura, tala de árboles, turismo y pesca (ilustración 1). El clima es semifrío, húmedo, con temperatura media anual de entre 5 y 12 °C. El parque recibe, en promedio, una lámina pluvial anual de 1,225 mm (Vargas-Márquez, 1984); la temporada húmeda se concentra en los meses de mayo a octubre.

Materiales y metodologías

Batimetría

Se realizó una batimetría en 11 puntos, con una cuerda con plomo que se sumergía hasta alcanzar la superficie del sedimento, donde se tomaba la lectura de la profundidad. Con base en los resultados de la

Ilustración 1. Ubicación de la laguna de Zempola.



batimetría, y usando el programa *Surfer* v. 7.02 y el método de interpolación de curvatura mínima con malla uniforme de 5 m, se estimó el volumen y la topografía del vaso.

Muestreo, almacenamiento y preparación de las muestras

Los muestreos fueron realizados desde una lancha inflable, empleando un nucleador de gravedad (Wilco, USA) con longitud de 50.8 cm, diámetro de 4.8 cm, peso de 18 kg y equipado con cable de acero inoxidable de 30 m de longitud. El volumen máximo de muestra es de 880 ml. Para obtener muestras de sedimentos lacustres no alterados, se tomaron dos núcleos por sitio, de los dos lugares más profundos de la laguna. Los núcleos fueron transportados al laboratorio en forma vertical y almacenados a -25 °C. Tres de los cuatro núcleos fueron cortados longitudinalmente para observar posibles estratificaciones, disturbios e indicadores locales. Las secciones individuales para los análisis químicos e isotópicos se obtuvieron del cuarto núcleo, de manera que las secciones resultaron en una cantidad mínima de muestra de 10 g de peso seco.

Análisis químicos

Se caracterizaron las secciones de los núcleos con la metodología para humedad por secado a 105 °C hasta peso constante y materia orgánica por calcinación a 440 °C hasta peso constante (ASTM, 1991). Para los análisis de DDT y sus metabolitos DDD [1,1-dicloro-2,2-bis(4'-clorofenil)etano] y DDE [1,1-dicloro-2,2-bis(4'-clorofenil)etileno], los sedimentos fueron secados a 45 °C, antes de la extracción por el método EPA 3546 (USEPA, 2000). Se realizó la cuantificación de estas sustancias por cromatografía de gases con detección semi-selectiva por captura de electrones de acuerdo con el método EPA 8081A-1996 (USEPA, 1996). Mediante la metodología de doble columna se realizó la verificación de los compuestos identificados. Los límites de cuantificación ($\mu\text{g}/\text{kg}$) determinados para cada una de las diferentes sustancias fueron DDT (0.01), DDD (0.01), DDE (0.008).

Análisis isotópicos

Usando espectrometría gamma de alta resolución con detector plano de germanio hiperpuro a 661.6 KeV y siguiendo la metodología descrita por Fuller *et al.* (1999), y Baskaran y Naidu (1995), se midieron las actividades de ^{137}Cs en los sedimentos. Para cada

segmento se usaron 5 g de sedimento seco. Las actividades de ^{210}Pb y ^{226}Ra fueron determinadas por un método no destructivo de conteo gamma en 5 g de sedimento seco (Baskaran y Naidu, 1995). Se calibró el sistema de conteo gamma como lo describen Fuller *et al.* (1999).

Resultados y discusión

Batimetría de la laguna de Zempoala

Los requisitos más importantes para el fechado de perfiles de sedimentos es: a) una tasa constante de sedimentación que permite aplicar una escala de tiempo lineal a las capas de sedimento, b) la presencia de sedimentos de material fino con capacidad de adsorber contaminantes y marcadores.

Generalmente se identifican tres zonas limnológicas en lagos y presas:

- La zona de la laguna, cerca de la entidad, que está influida por el río, y tiene características complejas de sedimentación, resuspensión y mezcla de material fino y grueso.
- La zona lacustre, caracterizada por una sedimentación más lenta y constante. Los sedimentos de esta zona consisten en material fino.
- La zona de transición, localizada entre la entidad de la laguna y la zona lacustre, y puede tener características de las dos.

Es en la zona lacustre donde hay más probabilidades de obtener núcleos no perturbados (Callender y Van Metre, 1997; Thornton, 1990). Usualmente esta zona se encuentra lejos del afluente y de la salida del lago, en las partes más profundas, donde se acumulan los sedimentos finos. Los datos batimétricos facilitan la identificación de los lugares más adecuados para el muestreo de núcleos.

Por análisis de las profundidades medidas, se encontró que en febrero de 2002, la laguna de Zempoala tenía un volumen total de aproximadamente $450,000 \text{ m}^3$. El espejo de agua de la laguna mide 11.5 ha y la profundidad promedio es de 3.91 m . El afluente de la laguna se encuentra en la parte oeste y el efluente en la parte norte del cuerpo de agua. El punto más profundo se encuentra a 8.80 m , en el noroeste, a 70 m de la orilla; le sigue la parte este con una profundidad de 7.60 m . Así, estas dos depresiones se calificaron como las zonas más adecuadas para realizar el muestreo. En lo sucesivo, estos dos puntos se denominan A y B.

Muestreo y caracterización de los perfiles

En el sitio A se extrajeron dos núcleos (núcleo 1 y 2) a profundidades que variaron entre 8 y 9 m . En el sitio B se tomaron otros dos núcleos (núcleo 3 y 4) a una profundidad de aproximadamente 7.5 m (ilustración 2). Los núcleos extraídos presentaron diferentes longitudes; el más largo fue el núcleo 4 con 45 cm y el más corto fue el núcleo 2 con 40 cm de sedimentos.

Se realizaron cortes longitudinales de los perfiles previamente congelados, utilizando una sierra eléctrica de banda. Una inspección visual de los perfiles cortados y pulidos en su superficie (tela húmeda) permitió identificar la estratificación presente en las capas de sedimentos de los dos sitios de muestreo (ilustración 3).

Los núcleos del sitio A se caracterizan por presentar en los primeros 22 cm un material fino en capas laminadas de color café oscuro y numerosas capas de un material fino y de un color más claro. Los contornos entre estos materiales no están claramente definidos. Después se encuentra un segmento de aproximadamente 3 cm de espesor, con capas de arena fina en láminas bien delimitadas, de color blanco y café claro. La capa inferior, de aproximadamente 4 cm de espesor, está constituida por arena más gruesa, con piedras de hasta 2 cm de diámetro. Debajo de esta capa se presenta de nuevo un segmento con características arenosas, seguido por capas de materiales finos como aparecían en los primeros 22 cm del perfil (ilustración 3).

Ilustración 2. Profundidad del agua en la laguna de Zempoala y localización de los puntos de muestreo.

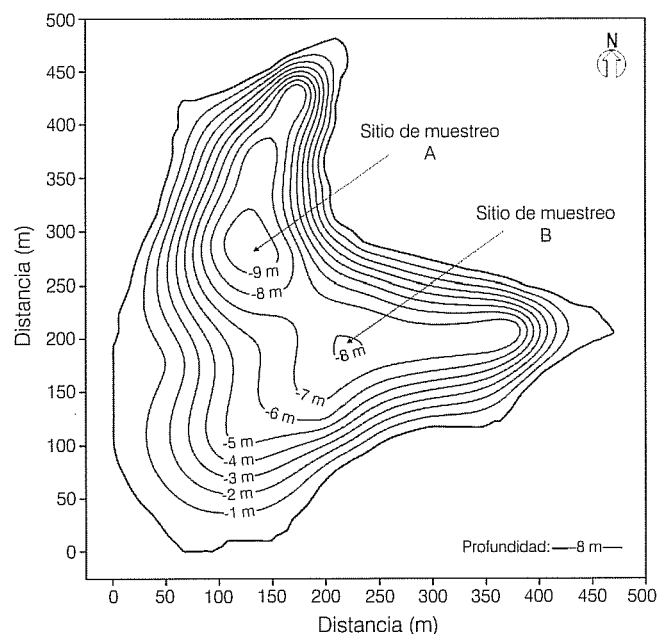
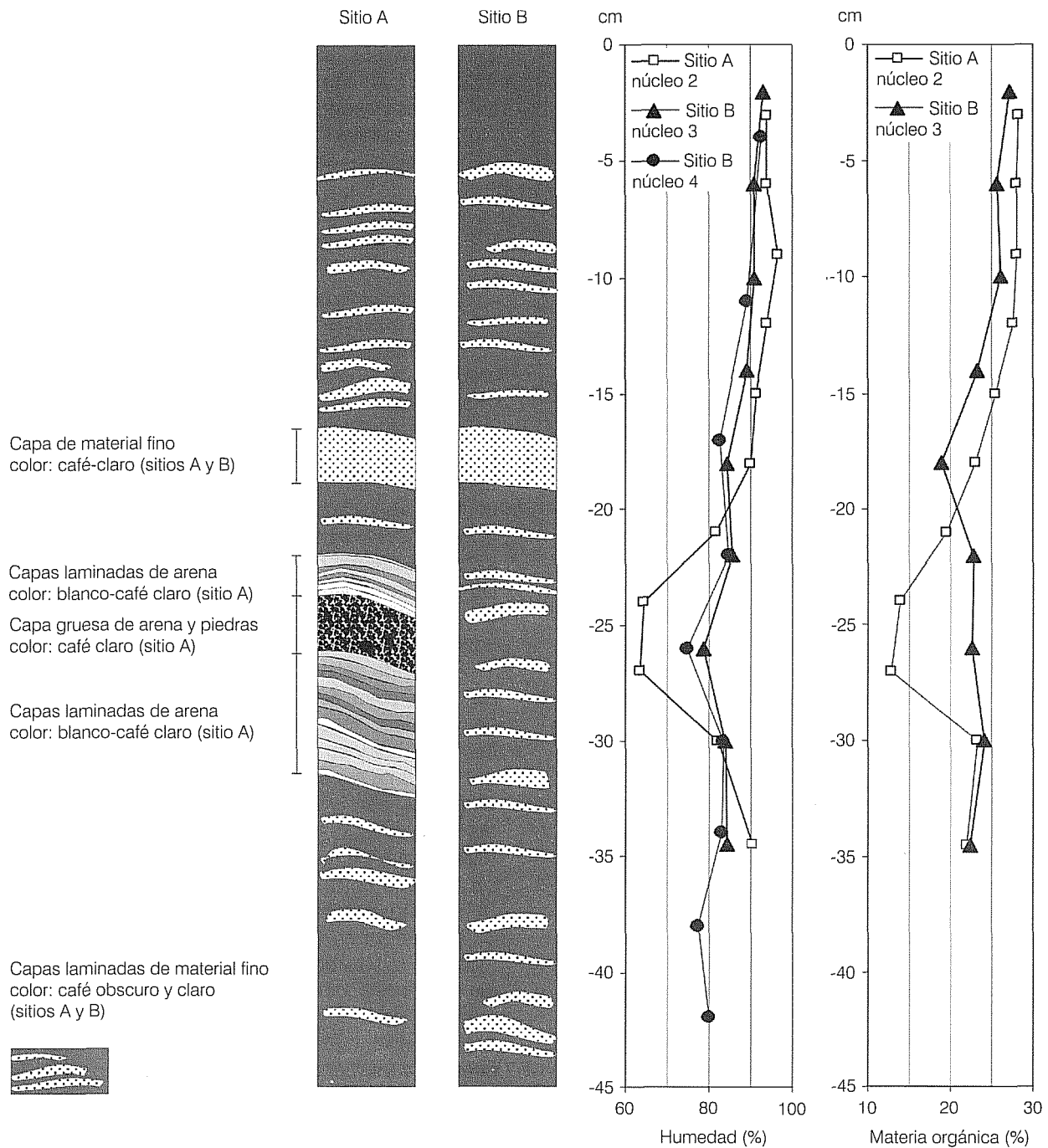


Ilustración 3. Esquema de la estratificación de los núcleos extraídos de los sitios A y B. Perfiles de humedad en los núcleos 2, 3 y 4. Perfiles de materia orgánica en los núcleos 2 y 3.



Los núcleos provenientes del sitio B son aparentemente más uniformes que los del sitio A. La totalidad de la estratificación de este sitio se caracteriza por un material en láminas finas de un color café oscuro, alternadas con numerosas capas de un color más

claro y contornos poco definidos. En todos los núcleos de los dos sitios se observa una capa uniforme de aproximadamente 2 cm de espesor, a una profundidad de unos 18 cm. Este material fino de color café claro no representa ninguna estratificación aparente que indique

que el material haya sido depositado en un solo evento sobre toda la laguna (ilustración 3).

Además de la caracterización visual, se midieron humedad y contenido de materia orgánica en diferentes segmentos de los núcleos. En la ilustración 3 se observa que el perfil de sedimentos del sitio B tiene un contenido de agua muy uniforme que varía entre 75 y 97% (w/w); la parte más húmeda y menos compacta se encuentra en las capas de sedimento menos profundo. Las partes superficiales y profundas del núcleo 2 del sitio A muestran un intervalo de humedad similar, pero entre 21 y 30 cm de profundidad, la humedad disminuye a 63%. Este segmento del perfil coincide con las capas arenosas de este sitio.

El contenido de materia orgánica, con respecto a la profundidad del núcleo, muestra un comportamiento uniforme, similar al de la humedad para el sitio B. En este lago, el contenido de materia orgánica varía entre 27 y 19%, pero disminuye con la profundidad, es decir, en la parte más profunda es menor el contenido de materia orgánica. Entre los 21 y 30 cm de profundidad, el núcleo 2 del sitio A muestra una reducción significativa del contenido de materia orgánica (13%), que corresponde a la capa de material arenoso que se identificó por la caracterización visual.

La caracterización visual y los resultados de humedad y materia orgánica en los núcleos indican que la capa de sedimentos del sitio B tiene una composición más homogénea que la del sitio A y probablemente se deba a una sedimentación más uniforme en este sitio. Por este motivo se seleccionó el núcleo 4 del sitio B para realizar los análisis químicos de los diferentes plaguicidas organoclorados y sus metabolitos, así como los análisis radiológicos (^{210}Pb y ^{137}Cs).

Las submuestras individuales para los análisis químicos e isotópicos fueron segmentos del núcleo entero, de manera que resultó una cantidad mínima de submuestra de 10 g de peso seco. Para obtener la longitud adecuada de cada segmento en el núcleo 4, se utilizó el contenido de humedad del sedimento, leída anteriormente para el núcleo 3 (ilustración 3). Como resultado se obtuvieron nueve secciones.

Fechado por métodos isotópicos

Para estimar la tasa de sedimentación en el sitio B de la laguna de Zempoala, se midió la actividad total de ^{210}Pb -total y la actividad de isótopo ^{226}Ra . La actividad del ^{210}Pb -total en los sedimentos tiene dos componentes:

a) El ^{210}Pb -base, que es producto del decaimiento *in situ* del isótopo ^{226}Ra (vida media 1,600 a) y que forma

parte de la estructura mineral de los sedimentos. La actividad de este componente se considera como fondo a lo largo del perfil de sedimentos.

b) El ^{210}Pb -depositado, que es producto del decaimiento del gas atmosférico ^{222}Rn (vida media 3.83 d) a ^{210}Pb , el cual se deposita en la superficie de suelos y sedimentos, lo que provoca un gradiente de actividad del ^{210}Pb que disminuye con la profundidad debido a su decaimiento (vida media 22.3 a).

Por definición, el ^{210}Pb -base está en equilibrio con el ^{226}Ra presente en los sedimentos y ambos tienen la misma actividad (Cisternas y Araneda, 2001). Así, la actividad del ^{210}Pb -depositado se puede calcular por la diferencia entre las actividades del ^{210}Pb -total y del ^{226}Ra (cuadro 1).

La tendencia de actividad del ^{210}Pb -depositado con respecto a la profundidad del núcleo permite calcular la antigüedad de los sedimentos en cada nivel y la tasa de sedimentación correspondiente. Para este cálculo se utilizó el logaritmo natural de las actividades de ^{210}Pb -depositado que decrece linealmente hacia el fondo del núcleo (ilustración 4). Considerando la relación entre la vida media del ^{210}Pb de 22.3 años y la pendiente del logaritmo natural del ^{210}Pb -depositado en función de la cantidad de sedimentos acumulados, se calculó una tasa de sedimentación promedio de $0.157 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ y una edad de la parte más profunda del núcleo de 49 años.

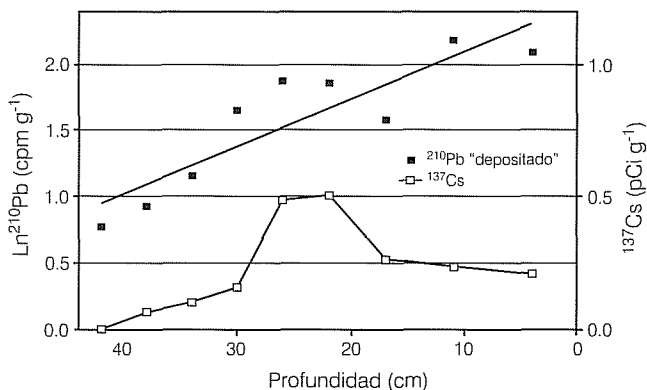
Se puede estimar la edad de los sedimentos a partir del ^{137}Cs , cuya vida media es de 30.3 años, ya que es un producto secundario de la generación de energía termonuclear y su presencia en el ambiente se relaciona directamente con la actividad termonuclear atmosférica. La producción (y deposición) de ^{137}Cs inició alrededor de 1952, y llegó a un máximo entre 1963 y 1964. Los resultados indican que la primera ocurrencia de ^{137}Cs se presenta entre 36 y 40 cm de profundidad del perfil de los sedimentos. La máxima actividad de ^{137}Cs fue detectada entre 20 y 28 cm de profundidad del núcleo (cuadro 1, ilustración 4). Dado que la resolución de las secciones del núcleo no es muy fina hay varias maneras para definir la profundidad a la que se refiere cada evento. Con la información de que los dos eventos tienen una diferencia en edad de 11 años, se calcularon por iteración las profundidades que reflejan esta diferencia.

El resultado indica que la primera ocurrencia de ^{137}Cs , en 1952, corresponde a una profundidad aproximada de 36 cm, mientras que el máximo de deposición de ^{137}Cs , en 1963, corresponde a 28 cm de profundidad. A partir de estos puntos en el perfil de sedimentos, se calcularon tasas de sedimentación de 0.117 y $0.114 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectivamente. Considerando estas tasas, la parte

Cuadro 1. Caracterización isotópica del núcleo 4 de la Laguna de Zempoala.

Profundidad de secciones (cm)			Sedimentos acumulados (g cm ⁻²)	¹³⁷ Cs (pCi g ⁻¹)		²¹⁰ Pb - total (dpm g ⁻¹)		²²⁶ Ra (dpm g ⁻¹)		²¹⁰ Pb - depositado (dpm g ⁻¹)	
Superficie	Fondo	Centro		Actividad	+/-	Actividad	+/-	Actividad	+/-	Actividad	+/-
0	8	4	0.49	0.215	0.036	8.31	0.68	0.23	0.22	8.08	0.71
8	14	11	1.41	0.239	0.036	9.23	0.66	0.36	0.23	8.88	0.70
14	20	17	2.39	0.264	0.034	5.64	0.55	0.75	0.24	4.89	0.60
20	24	22	3.32	0.507	0.040	7.03	0.56	0.59	0.23	6.44	0.61
24	28	26	4.21	0.491	0.045	7.02	0.63	0.47	0.26	6.55	0.68
28	32	30	5.08	0.163	0.027	5.46	0.47	0.21	0.19	5.24	0.51
32	36	34	5.78	0.106	0.035	3.41	0.57	0.23	0.26	3.18	0.62
36	40	38	6.56	0.071	0.025	2.92	0.41	0.38	0.20	2.54	0.46
40	44	42	7.46	0.004	0.025	2.32	0.45	0.15	0.20	2.17	0.49

Ilustración 4. Fechado del núcleo 4 con métodos isotópicos.



más profunda del núcleo tendría una edad aproximada de 66 a 67 años.

Para la reconstrucción del historial de la deposición de DDT se empleó la tasa de sedimentación de 0.129 g cm⁻² a⁻¹, obtenida como promedio de los resultados de los métodos de ¹³⁷Cs y ²¹⁰Pb.

Como se observa en la ilustración 3, a unos 18 cm de profundidad se identificó una capa uniforme de casi 2 cm de espesor, de color café claro, la cual presenta un material distinto al del resto del núcleo. La baja actividad de ²¹⁰Pb-depositado medido en este segmento indica que el material de esta capa proviene de una fuente más antigua, probablemente depositado en un evento singular en la laguna de Zempoala. Por esta razón, la tasa de sedimentación obtenida por la medición de los isótopos ²¹⁰Pb y ¹³⁷Cs podría estar sobreestimada.

Reconstrucción del historial de la deposición de DDT

Se cuantificaron el DDT y sus metabolitos en nueve segmentos del núcleo 4. No se detectó DDT como sustancia materna en el perfil de sedimentos, pero sí los metabolitos DDD y DDE. Se detectó DDE en seis de nueve secciones y DDD en cinco de nueve. El DDD representa, en promedio, el 65% del DDT-total, mientras que el DDE constituye el restante 35% (cuadro 2).

Esto coincide con los resultados publicados para otros lagos en Norteamérica, donde la concentración de DDT en sedimentos en la mayoría de los casos es más baja que la de sus metabolitos (Majewski y Mann, 2001; Greve et al., 2001; Van Metre et al., 1997a; Van Metre et al., 1996; Ging et al., 1999; Van Metre et al., 1997b; Lefkovitz et al., 1997; Yake, 2001).

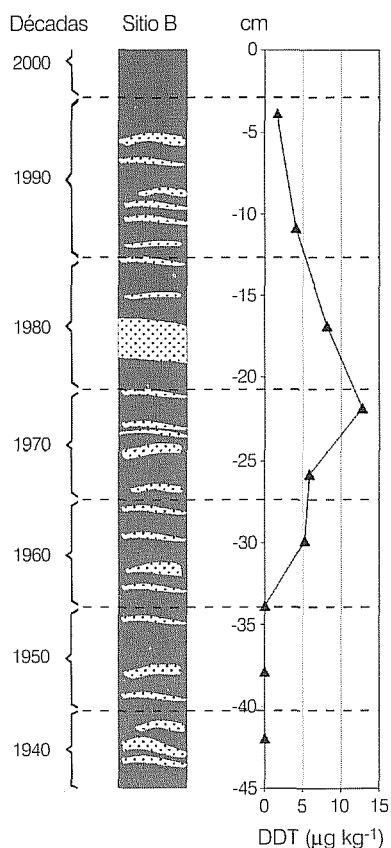
La ilustración 5 muestra la reconstrucción del historial de deposición de DDT-total en la laguna de Zempoala. Como se observa, el DDT-total aparece por primera vez en la sección 4 del perfil de sedimentos, la cual corresponde a la década de los sesenta, con una concentración de 5.3 µg/kg. El máximo de DDT-total se detectó en la sección 6, que representa los últimos años de los setenta y los primeros de los ochenta, con una concentración de 13.0 µg/kg. Después de este máximo, la concentración decrece en forma asintótica hacia la actualidad, cuyo valor de concentración es de 1.6 µg/kg.

Las concentraciones máximas encontradas en la laguna de Zempoala fueron de 13 µg/kg de DDT-total. Esta concentración es inferior al promedio de 44 µg/kg de las concentraciones máximas encontradas en lagos de los Estados Unidos de América (cuadro 3). Lo mismo se observa para las actuales concentraciones; los lagos

Cuadro 2. Resumen de los análisis químicos realizados en el núcleo 4 de la laguna de Zempoala.

Parámetro (unidades)	Unidades	Mín	Máx	Promedio
4, 4'-DDD	µg/kg	< 0.01	10.26	5.09 (n=10)
4, 4'-DDE	µg/kg	< 0.008	6.00	2.31 (n=10)
4, 4'-DDT	µg/kg	< 0.01	< 0.01	ND (n=10)

Ilustración 5. Distribución del DDT-total en el núcleo 4 de sedimento de la laguna de Zempoala.



de dicho país tienen en promedio 6 µg/kg, mientras que en la laguna de Zempoala esta concentración fue de 1.6 µg/kg en la capa superficial de sedimentos. Suponiendo que la concentración de 1.6 µg/kg en la laguna de Zempoala representa la deposición actual en el centro de México, se tiene una reducción en la deposición de DDT de alrededor del 87%.

Transporte de DDT

Debido a que tanto el DDT como sus principales metabolitos tienen valores para la constante de Henry de

entre 10^{-6} y 10^{-5} atm m³ mol⁻¹, pueden considerarse como compuestos semivolátiles. Por consiguiente, tienen la capacidad de transportarse por aire tanto en la fase gaseosa como adsorbidos por partículas atmosféricas (ATSDR, 2002).

El DDT depositado en el suelo o en el agua se volatiliza. Ya en la atmósfera, el insecticida adherido a partículas o en la fase gaseosa se mueve con las corrientes de aire hasta ser depositado de nuevo en el suelo o en los cuerpos de agua por la acción de la lluvia o por el peso de las partículas. Se ha demostrado que para algunos plaguicidas la concentración en el aire es inversamente proporcional a la altura y es en los primeros cincuenta metros donde se ha registrado la mayor concentración. No obstante, se ha detectado DDT a alturas de hasta 800 m (Watanabe, 1998).

La concentración más alta detectada en el núcleo de los sedimentos de la laguna de Zempoala corresponde al periodo de la segunda mitad de los setenta y primera de los ochenta. Considerando que la época de mayor uso de DDT en México fue a principios de los setenta, la reconstrucción histórica de la deposición de DDT (ilustración 5) sugiere un retraso de varios años en dicha deposición, lo cual podría ser un indicador del transporte de la sustancia desde lugares más distantes. Sin embargo, no se puede hacer una evaluación definitiva dada la incertidumbre en el cálculo de fechado usando los dos métodos referidos (²¹⁰Pb y ¹³⁷Cs) y debido a que se tienen pocos datos disponibles sobre la aplicación de DDT en la agricultura.

Al contrario de la literatura publicada, donde frecuentemente se reportan concentraciones residuales de DDT en sedimentos recientes, en la laguna de Zempoala sólo se encontraron los metabolitos DDD y DDE. Cuando el DDT se degrada, forma primero los metabolitos, los cuales tienen una vida media más larga que el DDT. Por lo tanto, la ausencia de la sustancia materna en capas superiores del perfil de sedimentos de la laguna de Zempoala implica que recientemente no hubo deposición de DDT, sino de los productos de degradación. Si esto es así, probablemente se han transportado estas sustancias desde lugares más distantes y el DDT ha sido transformado durante su

Cuadro 3. Análisis de los resultados disponibles de historiales de DDT en los EUA.

Lago	Estado	DDT-total ($\mu\text{g kg}^{-1}$)		Año del máximo	Referencia
		Mínimo reciente	Máximo histórico		
Sweetwater Reservoir	California	5	30	1963	Majewski y Mann (2001)
Dillon Reservoir	Colorado	1	1.4	1964	Greve <i>et al.</i> (2001)
Lake Harding	Georgia	5.9	35	Década de 1950	Van Metre <i>et al.</i> (1997a)
Lake Walter F. George	Georgia	5.5	74	1968	Van Metre <i>et al.</i> (1997a)
Lake Blackshear	Georgia	6.5	57	1970	Van Metre <i>et al.</i> (1997a)
Lake Seminole	Georgia	7.5	30	Principios década de 1960	Van Metre <i>et al.</i> (1997a)
Elephant Butte	New Mexico	1	10.5	1970	Van Metre <i>et al.</i> (1997b)
White Rock Lake	Texas	2	27	1965	Van Metre <i>et al.</i> (1996)
Lorence Creek Lake	Texas	5	120	1963-1966	Ging <i>et al.</i> (1999)
Amistad Reservoir	Texas	1.8	5.5	Principios década de 1970	van Metre <i>et al.</i> (1997b)
Falcon	Texas	1	10.5	1962	van Metre <i>et al.</i> (1997b)
Puget Sound	Washington	2	4.5	1945-1965	Lefkowitz <i>et al.</i> (1997)
Lake Washington	Washington	15	130	Principios década de 1960	Yake (2001)
Lake Ballinger	Washington	25	75	Principios década de 1960	Yake (2001)
Promedio		6	44	1964	

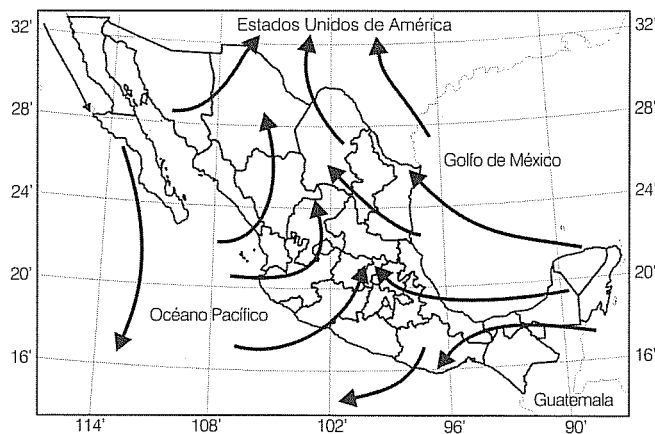
recorrido. Considerando que la cuenca de la laguna de Zempoala se encuentra en una región de baja aplicación de DDT en general y no hay población permanente ni agricultura, estos resultados indican que las concentraciones encontradas en los sedimentos de la laguna de Zempoala representan niveles causados exclusivamente por la deposición atmosférica en esta región.

En la ilustración 6 se observan los promedios mensuales de viento entre 1968 y 1996, a una altitud promedio de 1,300 msnm (NOAA, 2003). Estos vientos tienen una dirección predominante desde el este y sureste. También se observa que los vientos que pasan por la región del Caribe y el sureste de México se desplazan predominantemente hacia el oeste y el noroeste, pasando por el centro del país. Este comportamiento sugiere que si el DDT-total en el perfil de sedimentos de la laguna de Zempoala proviene de zonas más distantes, se pudo haber originado de aplicaciones en la región del Caribe y del sureste de México. Los vientos predominantes indicados con las flechas en la misma gráfica sugieren además que el DDT aplicado en el estado de Guerrero podría ser transportado a la zona de estudio.

Incertidumbre en el método

Como se mencionó anteriormente, los resultados del fechado guardan cierta incertidumbre, que depende principalmente de la mezcla en los sedimentos, de

Ilustración 6. Direcciones promedio de vientos (flechas) entre 1968 y 1996 (adaptado a una imagen del NOAA-CIRES Climate Diagnostic Center, NOAA 2003).



la posible variación en las tasas de sedimentación y de la resolución temporal obtenida en los cortes de los núcleos. Igual que el fechado, la interpretación de las concentraciones determinadas de DDT-total está íntimamente relacionada con otros tipos de incertidumbre, como son los límites de detección y el comportamiento de estas sustancias en el medio complejo de los sedimentos. Sin duda, uno de los mecanismos más importantes en este contexto es la biodegradación, que con el tiempo puede reducir la concentración de DDT-total; es decir, que no se

puede estar seguro de que la concentración medida en los núcleos de sedimentos refleja la concentración depositada.

Cuando el DDT se degrada, se forman primero los metabolitos DDD y DDE, los cuales se incluyen en la concentración total de DDT. Esta biotransformación parcial sólo representa un paso en la mineralización completa de DDT a bióxido de carbono, agua y cloruro, catalizado por hongos y microorganismos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Bumpus y Aust, 1987; Hay y Focht, 1998; Hauck *et al.*, 2001).

En la literatura se informan vidas medias muy variadas para la biotransformación de DDT en sedimentos y suelos, que van desde días hasta décadas. Para el DDE y el DDD, Howard *et al.* (1991) reportan una vida media de 2 y 15.6 años en suelos, respectivamente. Para demostrar el efecto de la biodegradación de DDT y sus metabolitos en la interpretación de los resultados para la laguna de Zempoala, se diseñó un ejemplo hipotético, suponiendo una cinética de degradación exponencial de primer orden en todas las profundidades del núcleo. Para esto se aplicaron tres diferentes vidas medias del DDT: sin biodegradación (vida media indefinida), una vida media de 15 años y una vida media de 10 años (ilustración 7). Este ejercicio demuestra la gran importancia que tiene la biodegradación, pues provoca una drástica disminución de las concentraciones máximas, así como un desplazamiento en el tiempo de los picos en la concentración de DDT-total.

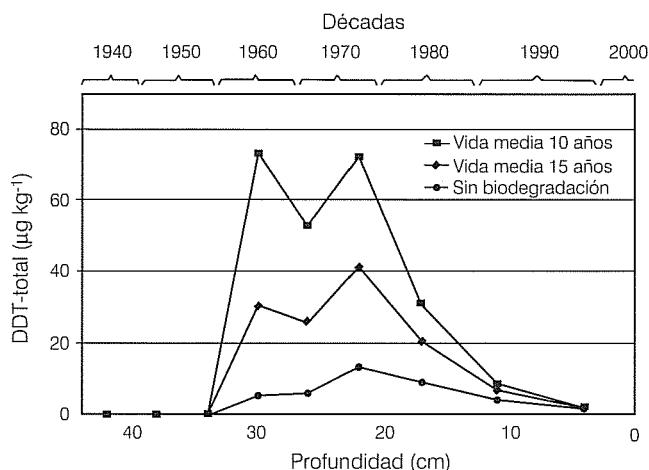
En este caso, sin considerar la biodegradación, los resultados originales muestran sólo un máximo en la deposición de DDT, mientras que los resultados considerando diferentes velocidades de biodegradación sugieren que podrían haber existido dos eventos.

Cabe mencionar que los estudios reportados en la literatura no consideran la biodegradación y las interpretaciones de estos estudios parten de la suposición de que el DDT y sus metabolitos DDD y DDE son persistentes una vez depositados en los sedimentos. Para poder obtener información más fidedigna sobre pasadas deposiciones de DDT y sus metabolitos, sería recomendable estudiar la biodegradación dentro de los sedimentos para cada caso particular. Esto abriría un campo nuevo para usarse en los casos de reconstrucción de historiales de otras sustancias orgánicas que son menos persistentes.

Conclusiones

En términos generales, los resultados del estudio demuestran que la metodología de análisis de núcleos de sedimentos, por su composición isotópica (^{210}Pb

Ilustración 7. Ejemplo hipotético de una reconstrucción de la historia de deposición de DDT, incluyendo la biodegradación.



y ^{137}Cs), representa una herramienta muy importante para la reconstrucción del historial de la deposición de contaminantes persistentes, específicamente en países que no cuentan con programas de monitoreo de estas sustancias.

Aunque el método posee ciertos errores, tanto en la cuantificación exacta de la escala de tiempo como en la cuantificación exacta de las concentraciones de deposiciones históricas, permite la generación de datos para un mejor control de los programas ambientales, por ejemplo, para programas de reducción de emisiones de contaminantes orgánicos persistentes. La recuperación de los datos históricos en el país requiere la definición de una red adecuada de lagunas localizadas en cuencas cerradas remotas para detectar deposiciones de fondo, así como lagunas claramente afectadas por actividades humanas, que permitan definir zonas prioritarias altamente perturbadas, con el fin de optimizar actividades para su rehabilitación.

En términos específicos, los resultados del estudio también indican que la deposición atmosférica de DDT y sus metabolitos en la laguna de Zempoala ha bajado continuamente en las últimas décadas, desde principios de los ochenta, para llegar en la actualidad a concentraciones aún más bajas que en otros lagos reportados. Este comportamiento refleja claramente el éxito de las medidas y políticas mexicanas de reducción y eliminación del uso de DDT en el centro del país.

Agradecimientos

Por el financiamiento y todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto, agradecemos a la Comisión para la Cooperación

Ambiental de América del Norte (CCAAN) y específicamente a Hernando Guerrero y José Manuel Galindo de la Oficina de Enlace en México con la CCAAN. Asimismo, expresamos nuestro reconocimiento al doctor Meter Van Metre del US Geological Survey por compartir sus experiencias en la metodología usada y la interpretación de resultados. Por su apoyo en la realización del muestreo y en la preparación de muestras, agradecemos a nuestros compañeros Nicolás Chapelain, Luis Carlos González y Franklin Torres.

Recibido: 01/06/2004
Aprobado: 17/08/2004

Referencias

- ASTM. *D2974-00 Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials Internacional, 1991, 4 pp.
- ATSDR. *Toxicological profile for DDT, DDE, and DDD*. [en línea]. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp35.html>, 2002.
- BASKARAN, M. y NAIDU, A.S. ^{210}Pb -derived chronology, and the fluxes of ^{210}Pb and ^{137}Cs isotopes into continental shelf sediments, East Chukchi Sea, Alaskan Arctic. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 59, 1995, pp. 4435-4448.
- BUMPUS, J.A. y AUST, S.D. Biodegradation of DDT [1, 1, 1-trichloro-2, 2-bis (4-chlorophenyl) ethane] by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.* Vol. 53, 1987, pp. 2001-2008.
- CABALLERO-RAMÍREZ, M. Diagnóstico situacional del uso de DDT y el control de la malaria. *Informe regional para México y Centroamérica*. México, D.F.: Instituto de Salud, Ambiente y Trabajo de México, 2002, 58 pp.
- CALLENDER, E. y VAN METRE, P.C. Reservoir sediment cores show U.S. lead declines. *Env. Sci. Technol.* Vol. 31, 1997, pp. 424-428.
- CASAS, M., TORRES, J.L., BOWN, D.N., RODRÍGUEZ, M.H. y ARREDONDO-JIMÉNEZ, J.I. Selective and conventional house-spraying of DDT and bendiocarb against *Anopheles pseudopunctipennis* in Southern Mexico. *Journal of the American Mosquito Control Association*. Vol. 14, 1998, pp. 410-420.
- CCAAN. *Programa regional de acción y demostración de alternativas sustentables para el control de vectores del paludismo sin el uso del DDT en México y América Central*. [en línea]. Informe final. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. www.cec.org/files/pdf/POLLUTANTS/PAEDDT-Pub_TTL_EN.pdf, 2004a, 8 pp.
- CCAAN. *Historia del DDT en América del Norte*. [en línea]. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. http://www.cec.org/files/PDF/POLLUTANTS/historialDDTs_ES.PDF, 2004b, 9 pp.
- CISTERNAS, M. y ARANEDA, A. Variaciones isotópicas (^{210}Pb , ^{137}Cs) antropogénicas en el registro estratigráfico de un lago de la cordillera de Nahuelbuta, Chile. *Rev. Geol. Chile*. Vol. 28, 2001, pp. 105-115.
- CLARK, I.D. y FRITZ, P. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Boca Raton, Estados Unidos de América: Lewis Publishers, 1997, 328 pp.
- FERRETTI, J. *El tratado de Estocolmo y la experiencia del TLCAN muestran el camino hacia un mundo más sano*. [en línea]. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. http://www.cec.org/files/PDF/POLLUTANTS/DDT-ed-s_ES.PDF, 2004, 2 pp.
- FULLER, C.C., VAN GEEN, A., BASKARAN, M. y ANIMA, R. Sediment chronology in San Francisco Bay, California, defined by ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{137}Cs , and $^{239,240}\text{Pu}$. *Marine chemistry*. Vol. 64, 1999, pp. 7-27.
- GEYH, M.A. y SCHLEICHER, H. *Absolute age determination: physical and chemical dating methods and their application*. Berlín: Springer-Verlag, 1990, 503 pp.
- GING, P.B., VAN METRE, P.C. y CALLENDER, E. *Bottom sediments of Lorence Creek Lake, San Antonio, Texas, reflect contaminant trends in an urbanizing watershed*. [en línea]. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-149-99, <http://water.usgs.gov/pubs/FS/Fs14999/>, 1999, 4 pp.
- GREVE, A.I., SPAHR, N.E., VAN METRE, P.C. y WILSON, J.T. *Identification of water-quality trends using sediment cores from Dillon Reservoir, Summit County, Colorado*. Water-Resources Investigations Report 01-4022. U.S. Geological Survey, 2001, 33 pp.
- HAUCK, R., ADRIAN, L., WENDLER, P., AMIDJOJO, M., HEGEMANN, W. y GÖRISCH, H. Transformation of 2, 2'-dichlorodiisopropyl ether in mixed and pure culture. *Applied microbiology and biotechnology*. Vol. 56, 2001, pp. 491-495.
- HAY, A.G. y FOCHT, D.D. Cometabolism of 1, 1-Dichloro-2, 2-Bis (4-Chlorophenyl) Ethylene by *Pseudomonas acidovorans* M3GY Grown on Biphenyl, *Appl Environ Microbiol.* Vol. 64, 1998, pp. 2141-2146.
- HOWARD, P.H., BOETHLING, R.S., JARVIS, W.F., MEYLAN, W.M. y MICHALENKO, E.M. *Handbook of environmental degradation rates*. Chelsea, Estados Unidos de América: Lewis Publishers, 1991, 326 pp.
- JENSEN, J., ADARE, J. y SHEARER, R. *Canadian Arctic contaminants assessment report*. Northern Contaminants Programme, Indian and Northern Affairs Canada. Ottawa: Minister of Public Works and Government Services Canada, 1997, 460 pp.
- LEFKOVITZ, L.F., CULLINAN, V.I. y CRECELIUS, E.A. *Historical trends in the accumulation of chemicals in puget sound*. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 111. National

- Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Springs, MD., 1997, 60 pp.
- MAJEWSKI, M.S. y MANN, M.A. *Water-quality monitoring of sweetwater reservoir*. USGS Fact Sheet 070-01, U.S. Geological Survey, 2001, 4 pp.
- NOAA. *NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado*, [en línea]. <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/DataMenus.pl?stat=mon.ltm&dataset=NCEP>, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2003.
- SSA. *Situación actual de la malaria y el uso de DDT en México*. México, D.F.: Secretaría de Salud, Centro Nacional de Vigilancia Epidemiológica, Centro Nacional de Salud Ambiental, 2000, 61 pp.
- THORNTON, K.W. Sedimentary process. *Reservoir limnology: ecological perspectives*. Thornton, K.W., Kimmel, B.L. y Payne, F.E. (editores). Nueva York: John Wiley and Sons Inc., 1990, pp. 43-69.
- UNEP. *Stockholm convention on persistent organic pollutants*. Ginebra: United Nations Environment Programme. Organización de las Naciones Unidas, 2001, 34 pp.
- USEPA. *Method 3546, Microwave extraction*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2000, 13 pp.
- USEPA. *Method 8081A. Organochlorine pesticides by gas chromatography*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1996, 44 pp.
- VAN METRE, P.C., CALLENDER, E. y FULLER, C.C. Historical trends in organochlorine compounds in river basins identified using sediment cores from reservoirs. *Env. Sci. Technol.* Vol. 31, 1997a, pp. 2339-2344.
- VAN METRE, P.C., LAND, L.F. y BRAUN, C.L. *Water-quality trends using sediment cores from White Rock Lake, Dallas, Texas*. USGS Fact Sheet FS-217-96. Iowa: U.S. Geological Survey, 1996, 4 pp.
- VAN METRE, P.C., MAHLER, B.J. y CALLENDER, E. *Water-quality trends in the Rio Grande/Río Bravo basin using sediment cores from reservoirs*. USGS Fact Sheet FS-221-96. Iowa: U.S. Geological Survey, 1997b, 8 pp.
- VARGAS-MÁRQUEZ, F. *Parques nacionales de México y reservas equivalentes. Pasado, presente y futuro*. Colección: Grandes Problemas Nacionales. Serie: Los Bosques de México. México, D.F.: Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México, 1984, 142 pp.
- WATANABE, T. Determination of the concentration of pesticides in atmosphere at high altitudes after aerial application. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* Vol. 60, 1998, pp. 669-676.
- YAKE, B. *The use of sediment cores to track persistent pollutants in Washington State. A review*. Environmental Assessment Program, Olympia, Washington 98504-7710. Publication No. 01-03-001. Washington State Department of Ecology, 2001, 44 pp.

Abstract

VAN-AFFERDEN, M., HANSEN, A. & FULLER, CH. Reconstruction of historical atmospheric deposition of DDT in the Zempoala Lagoon, in the center of Mexico. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 3, July-September, 2005, pp. 71-83.

Historical trend in deposition of DDT and its metabolites has been reconstructed by analyzing sediment cores of the Zempoala Lagoon, in the center of Mexico. The small watershed of this mountain lagoon is closed, and it is located between 2.800 and 3.700 masl. It is neither affected by agriculture nor by permanent populations. The Zempoala Lagoon has an average depth of 3.9 m and a maximum depth of 8.8 m. Sediments were extracted with a core sampler and analyzed by isotope methods (^{137}Cs and ^{210}Pb) for dating. Average sedimentation rate was determined in $0.129 \text{ g cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, corresponding to a maximum age of the 44 cm core of approximately 60 years. The first presence of total-DDT occurs in a depth between 28 and 32 cm of the sediment profile, corresponding to the 1960's, with a concentration of $5.3 \mu\text{g kg}^{-1}$. The maximum concentration of total-DDT ($13.0 \mu\text{g kg}^{-1}$) occurs in sediment layers representing the late 1970's and beginning 1980's. More recently the concentration decreases towards the present concentration of $1.6 \mu\text{g kg}^{-1}$. This concentration is below most DDT levels reported in recent sediment studies in the USA. The results indicate that the Zempoala Lagoon represents a natural recipient for studies of the reconstruction of historical trends of atmospheric contaminant deposition in this region. The limitations of the methodology applied, due to the influence of biodegradation on the definition of correct historical concentrations of DDT depositions, are demonstrated.

Keywords: DDT, sediment core, deposition, dating, ^{137}Cs , ^{210}Pb .

Dirección institucional de los autores:

Dr. Manfred van Afferden

Dr. Anne M. Hansen

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México, CP 62550,
teléfono: + (52) (777) 329 3600,
fax: + (52) (777) 319 4341,
afferden@tlaloc.imta.mx,
anisen@tlaloc.imta.mx

Dr. Christopher C. Fuller

US Geological Survey,
345 Middlefield Rd. MS 465, Menlo Park,
CA 94025, USA,
teléfono: 650 329 4479,
fax: 650 329 4545,
ccfuller@usgs.gov