

## Presencia de metales pesados en cultivos del Valle del Mezquital, México

F. Prieto-García<sup>1\*</sup>, M. A. Méndez-Marzo<sup>2</sup>, F. H. Martínez-Pezina<sup>1</sup> y J. Prieto-Méndez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Carr. Pachuca-Tulancingo km 4.5, Pachuca, Hidalgo, CP: 42076 México

Recibido 9 Marzo 2007, Revisado 10 Mayo 2007, Aceptado 29 Mayo 2007

---

*Bioaccumulation of heavy metals in Valle del Mezquital crops, Mexico*

### Abstract

Soils contain traces of metals of several types: soluble, interchangeable and complex species represent those of greater mobility and govern their migration and phytodisponibility towards crops. In this work the bioaccumulation of Cd Cr, Pb, As and Hg was evaluated, in different crops of the municipalities of Actopan and Ixmiquilpan, in the Valley of the Mezquital, state of Hidalgo (Mexico). Samples from most crops like eatable cactus, magueys, habas and maize were taken, cultivated in different varieties of soils with distinct textures, which are irrigated with wastewaters. Elevated concentrations of Pb (values up to 22,86 mg kg<sup>-1</sup>) and relatively high concentrations of As and Hg (values up to 0,69 and 1,45 mg kg<sup>-1</sup>, respectively), were detected, suggesting it is necessary to undertake actions with the purpose of recovering the quality of the water required for irrigation as well as the soils in which these crops are grown. For the remaining metals monitored, bioaccumulations appeared insignificant. Further investigation with respect to the factors determining the selective bioaccumulation of trace elements is demanded.

*Keywords:* bioaccumulation, soils, crops, heavy metals, phytodisponibility.

### Resumen

Los suelos contienen metales traza de varios tipos; las especies solubles, intercambiables y acomplexadas, son las de mayor movilidad en sólidos y rigen su migración y determinan su fitodisponibilidad hacia los cultivos. En este trabajo se evaluó la bioacumulación de Cd, Cr, Pb, As y Hg en cultivos de las municipalidades de Actopan e Ixmiquilpan, en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. Se tomaron muestras de cultivos mayoritarios como nopales, magueyes, habas y maíz, cultivados en diferentes variedades de suelos con texturas variadas y que son regados con aguas negras. Se encontraron concentraciones elevadas de Pb (valores hasta 22.86 mg kg<sup>-1</sup>) y relativamente altas en As y Hg (valores hasta 0.69 y 1.45 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), por lo cual es necesario emprender acciones con el fin de restaurar tanto la calidad del agua de riego así como de los suelos sobre los cuales se siembran dichos cultivos. Para los restantes metales, se pueden considerar bioacumulaciones de nivel bajos. Hace falta mayor investigación respecto a los factores que rigen la bioacumulación selectiva de elementos traza en los cultivos, ya que existe mucha controversia respecto a los mecanismos que gobiernan el paso de dichos elementos desde un medio contaminado hacia los cultivos.

*Palabras clave:* bioacumulación, suelos, cultivos, metales pesados, fitodisponibilidad.

---

### Introducción

La escasez de agua ha ocasionado la implantación de técnicas de reuso de agua como alternativas de riego. Estas prácticas producen alteraciones en la flora y fauna de una región determinada, modificando los fondos de especies (Cepeda, 1999). A

pesar de los índices de contaminantes que las aguas residuales presentan, éstas han sido utilizadas desde hace ya más de un siglo en México (desde 1896), en la irrigación de cultivos (CNA y BGS, 1995). La accesibilidad de un elemento a las plantas está

---

\* Autor para correspondencia  
E-mail: prietog@uaeh.reduaeh.mx

Tabla 1. Resultados de las determinaciones de metales pesados realizados en el período de 1974 a 1987. (tomado de García et al., 2001).

Referencia	Cultivo	Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	
Mascareño (1974)	Alfalfa	0.04	0.18	525.00	
Acosta (1980)	Alfalfa	1.53	2.50	19.00	
	Alfalfa	–	9.20	11.21	
Méndez (1980)	Maíz	–	4.00	8.00	
	Trigo	–	6.00	10.00	
	Cebada	–	15.30	12.66	
	Calabaza	–	14.70	15.20	
	Alfalfa	Tallo	11.9	8.5	31.3
		Hojas	12.2	13.8	26.0
García (1987)	Maíz (Hojas)	11.4	7.8	27.8	
	Calabaza (Hojas y Tallos)	10.9	12.8	34.3	
	Frijol	Tallo	11.8	15.7	25.5
		Hojas	11.8	15.7	47.0
	Frijol	Tallo	12.8	12.4	27.0
		Hojas	11.5	16.8	31.9

Tabla 2. Resumen de las concentraciones de metales pesados medidos en maíz y alfalfa por Mejía Barrón et al. (1990).

	Cu	Zn	Mn	Ni	Cr	Pb	Cd	Co
	(mg kg <sup>-1</sup> )							
Maíz	10.7 – 25.7	48 – 207	44 – 138	4.1 – 9.5	0.6 – 5.3	1.6 – 15.6	0.8 – 2.9	1.4 – 8.2
Alfalfa	7.1 – 16.2	23 – 60	29 – 205	6.0 – 10.9	0.3 – 7.2	4.4 – 11.3	0.3 – 1.05	2.1 – 4.9

Tabla 3. Cultivos recolectados y analizados por tipo de serie de suelos y poblado.

Cultivo	Clasificación de series de suelos	
	Poblado	Serie de Suelo
Nopal	Actopan	Progreso
	Francisco Villa	Tepatepec
	Ixmiquilpan	Lagunilla
Maguey	Actopan	Actopan
	Lagunilla	Lagunilla
	Francisco Villa	Tepatepec
Habas	Ixmiquilpan	Actopan
	Actopan	Progreso
Maíz	San Salvador	Actopan

determinada por su origen, formas químicas y su asociación con componentes del suelo. La evaluación de la contaminación del suelo y la adopción de estándares aceptables para niveles permisibles de metales traza en suelos, son la clave para proteger la función ecológica del suelo con el fin de tener una agricultura sostenible.

Los suelos contienen metales traza litogénicos, an-

tropogénicos y pedogénicos cuya distribución varía debido a las transformaciones de los minerales y a otros procesos en el suelo. Las especies solubles, intercambiables y acomplexadas de elementos traza son las de mayor movilidad y rigen su migración y determinan su fitodisponibilidad (Kabata-Pendias y Pendias, 1995).

En la zona de estudio se cultiva alfalfa, maíz, trigo,

avena, frijol, jitomate, chile y betabel. Existe una restricción para cultivos de lechuga, col, cilantro, rábano, zanahoria, espinacas y perejil, debida a la regulación para el reuso de aguas residuales (Maples, 1990), referida al riesgo por presencia de microorganismos patógenos; sin embargo, se continúan cultivándose.

Se han realizado estudios de metales pesados en agua, suelo y cultivos de la región del Valle del Mezquital. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos durante los estudios realizados de 1974 a 1987 (García et al., 2001). Algunos valores son demasiado altos, como lo es el caso del valor que se reporta por Mascareño y Castro en 1974 para Pb en alfalfa ( $525.00 \text{ mg kg}^{-1}$ ), valor que sobrepasa de todos los demás resultados (García et al., 2001). García Zúñiga (1990), reporta valores de  $31.3 \text{ mg kg}^{-1}$  como valor más alto encontrado, lo que es una contradicción aparente por cuanto los sistemas de riego han continuado sin interrupciones en la zona. Mejía Barrón et al. (1990) reportaron estudios sobre el contenido de metales pesados en maíz y alfalfa en el Distrito de Riego 03 (DR03); realizaron cuatro cuantificaciones diferentes a lo largo del ciclo de cultivo primavera-verano de 1988. Los metales que fueron analizados en este trabajo fueron Cd, Co, Cu, Ni, Pb y Zn. La Tabla 2 describe los resultados, pero se debe hacer notar, que en el ciclo del cultivo de la alfalfa entre primavera y verano (aproximadamente 6 meses) debieron producirse de 2-3 cortes de este cultivo, lo cual indica que las diferencias entre los resultados no sólo se deban a las condiciones estacionarias sino también al hecho de ser cortes o muestras diferenciadas.

Estos trabajos muestran algunas limitaciones; el impacto de los metales pesados ha estado restringido a superficie y tipos de suelos, no especifican las formas de muestreos, criterios estadísticos de resultados y en la mayoría, fueron estudios puntuales. El monitoreo de Pb, Cr y Cd ha sido fragmentario; no se reportan estudios globales en todos los suelos del DR03. No existe información sobre Hg y As reportada anteriormente, ni se tiene reportado un estudio completo de todo el DR03 sobre la correlación de parámetros físico-químicos de los suelos con los metales pesados (Cd, Pb, Cr y Hg), el metaloide As y su impacto en

cultivos por el tiempo de irrigación con aguas negras.

Basándose en una clasificación de los suelos del DR03 realizada por la Dirección de Agrología de la SARH (1980), por sus condiciones edáficas, texturas y fases en estos suelos, se definen cuatro tipos de series: Actopan, Lagunilla, Progreso y Tepatepec. En general, presentan texturas franco arenosa a franco arcillosa, cuyos principales componentes son arenas y fragmentos de andesitas, riolitas y tobas volcánicas. Pendientes ligeramente menores o iguales al 2%; drenaje superficial pobre, con drenaje interno excesivo (SARH, 1980).

El objetivo de este trabajo es comparar los índices de metales acumulados en cultivos de suelos irrigados por años con aguas negras, con cultivos selectos, obtenidos de suelo denominado "suelo cero" o suelo de control negativo (colectados en una zona que sólo recibe aguas de riego de temporal).

## Material y métodos

### Muestras y preparación

Los cultivos se recolectaron a lo largo de la zona que se indica en la Figura 1 donde además se señalan los puntos muestreados. Las muestras de cultivos se tomaron mediante un muestreo estratificado y aleatorio. De cada parcela de cultivos de aproximadamente una hectárea, se tomaron muestras en cinco puntos diferentes, colectándose de esta forma aproximadamente de 1.5 a 2.5 kg de cada cultivo.

Se analizaron los cultivos de secano, es decir, aquellos cultivos que tienen un periodo mínimo de siembra a recolección, de seis meses; y en algunos casos son cultivos con duraciones de 1 a 2 años. La zona evaluada abarca una extensión de 11,290.92 ha, y comprende las áreas que van desde el Municipio de Actopan al Municipio de Ixmiquilpan (Figura 1). Se tomaron cultivos en los poblados de Actopan, San Salvador, Francisco Villa, Lagunilla, e Ixmiquilpan. Las muestras de cultivos analizados dependieron principalmente de la disponibilidad de éstos durante las campañas de muestreo, y al tipo de serie de suelo donde se encontraban sembrados. La Tabla 3 muestra los cultivos analizados, así como el nombre del poblado y la serie de suelo

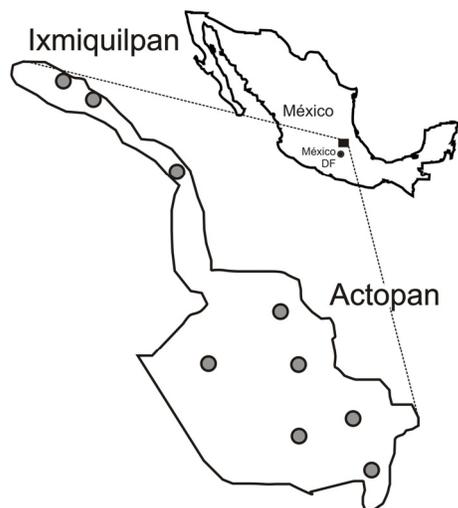


Figura 1. Zona de estudio mostrando los lugares donde se procedió a la toma de muestras de los cultivos.

donde fueron recolectados.

Las edades de los cultivos fueron muy variadas debido a las disponibilidades reales en los momentos en que se efectuaron las campañas de muestreos. Así se tienen edades de cultivos que van desde 4–5 meses para habas y frijoles; de 8–12 meses para cultivos de maíz; de 14–20 meses para trigo y cebada y de 2–7 años para cultivos de nopales y maguey.

Posteriormente, se separó a la planta en sus componentes (hojas, raíces, tallos). Para el secado de las muestras, se colocaron éstas en una charola metálica, y se introdujeron a un horno Lindberg/Blue M, a temperatura de  $65 \pm 2$  °C durante un tiempo de 72 horas; algunas muestras requirieron mayores tiempos de secado, máximo de 96 horas. Las muestras secas se trituraron manualmente y en mortero de porcelana; posteriormente se vaciaron en tamices Tyler n° 35 (500  $\mu\text{m}$ ) y se colocaron en un tamizador automático marca Rotap durante 15 minutos; de este proceso de tamizado se seleccionó la fracción cuyo tamaño de partícula fuera menor de 500  $\mu\text{m}$ .

Fue necesario obtener algunas muestras de cultivos “cero”, consideradas como aquellas que cultivadas en otras áreas, nunca han recibido aguas negras para el riego. Considerando además que se encuentren en suelos similares en texturas a los

estudiados. Por ello se consiguieron los cultivos de nopal y maguey, que fueron tomados en la Carretera Pachuca-Ciudad Sahagún, a la altura del km 11. Estos cultivos fueron tomados conjuntamente con una muestra de suelo para su evaluación y comparación; y se conoce que sólo han sido irrigados con agua de temporal.

#### *Digestión de las muestras para el análisis*

##### *-Digestiones con $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ :*

Se pesaron 0.500 g de muestra de suelo y se le añadieron 10 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado, se calentó en una parrilla eléctrica hasta casi sequedad; posteriormente, se dejó enfriar y se adicionaron 10 ml de  $\text{HClO}_4$  concentrado, calentando hasta casi sequedad. Terminado el tiempo de evaporación se agregó agua desionizada, se filtró a vacío y el filtrado se aforó a 50 ml.

##### *-Por Microondas :*

Se utilizó un Horno de Microondas marca Mars X, con potencia de 1200 W y con carrusel para 14 vasos de teflón. Se pesaron 0.250 g de la muestra de cultivo y se transfirieron a los vasos, se añadieron 10ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado para realizar las digestiones correspondientes.

Posterior al proceso de digestión se filtraron las muestras a vacío, previamente habiendo tarado el papel filtro. El líquido filtrado también se afora a 50 ml. De igual forma se manejaron las muestras de los cultivos “cero” (Lucho et al., 2005).

#### *Método de Análisis*

Se utilizó un espectrofotómetro Varian Spectra 800 para las determinaciones de los metales estudiados, utilizando la técnica de llama para Cd, Cr y Pb, mientras que para Hg se utilizó la técnica de vapor frío (VF) y para As se utilizó la técnica de generación de hidruros (GH).

Para las determinaciones de As, se realizó una pre-reducción, con KI al 1% y HCl 1M y se adicionó 3 ml de Ácido Ascórbico, para evitar la reducción del KI a  $\text{I}_2$ . Para la generación de hidruros se utilizó una disolución de  $\text{NaBH}_4$  al 0.6% (m/v) en NaOH al 0.5% (m/v).

Para las determinaciones de Hg, las soluciones fueron analizadas en matriz de HCl al 20%, utilizando como reductor una solución de  $\text{SnCl}_2$  al 25% (m/v) en HCl al 20% (v/v).

Tabla 4. Contenido de Cd, Cr y Pb en cultivos de nopal, maguey, habas y maíz. Entre paréntesis aparecen los resultados de los % desviación estándar relativa (%DER). LDE: para [Cd] mg kg<sup>-1</sup>, <0.0052; para [Cr] mg kg<sup>-1</sup>, <0.0577 y para [Pb] mg kg<sup>-1</sup>, <0.0352

Muestra	Serie de Suelo	[Cd] mg kg <sup>-1</sup>	[Cr] mg kg <sup>-1</sup>	[Pb] mg kg <sup>-1</sup>
<u>Nopal:</u>				
Actopan Pulpa	Progreso	10.9418 (0.55)	<0.0058 (2.75)	11.1092 (1.60)
Actopan Corteza	Progreso	5.0221 (1.90)	<0.0058 (1.80)	22.4298 (1.70)
Fco. Villa Pulpa	Tepatepec	< 0.0052 (11.20)	< 0.0577 (19.45)	15.3705 (10.05)
Fco. Villa Corteza	Tepatepec	< 0.0052 (8.35)	< 0.0577 (21.20)	17.5427 (15.75)
Ixmiquilpan Pulpa	Lagunilla	< 0.0052 (12.05)	< 0.0577 (9.50)	6.5707 (21.45)
Ixmiquilpan Corteza	Lagunilla	< 0.0052 (4.80)	< 0.0577 (31.60)	7.1746 (6.90)
<u>Maguey:</u>				
Actopan Pulpa	Actopan	<0.0052 (4.85)	7.6260 (3.15)	<0.0352 (10.10)
Actopan Corteza	Actopan	0.0339 (1.45)	23.7121 (2.30)	3.5958 (4.50)
Lagunilla Pulpa	Lagunilla	< 0.0052 (3.75)	< 0.0577 (19.00)	22.8552 (8.45)
Lagunilla Corteza	Lagunilla	< 0.0052 (5.50)	< 0.0577 (49.70)	29.5801 (6.80)
Fco. VillaPulpa	Tepatepec	<0.0052 (2.05)	<0.0577 (4.20)	<0.0352 (19.15)
Fco.Villa Corteza	Tepatepec	0.2031 (5.05)	<0.0577 (4.90)	<0.0352 (52.65)
Ixmiquilpan Pulpa	Lagunilla	< 0.0052 (7.90)	< 0.0577 (44.60)	16.5079 (13.70)
Ixmiquilpan Corteza	Lagunilla	< 0.0052 (8.75)	< 0.0577 (57.25)	16.4306 (9.65)
<u>Habas:</u>				
Actopan Raíz	Progreso	0.6818 (0.80)	20.3143 (1.20)	9.8598 (8.85)
Actopan Tallos	Progreso	<0.0052 (2.05)	14.9078 (1.15)	12.0490 (9.15)
Actopan Hojas	Actopan	<0.0052 (4.65)	<0.0577 (1.60)	10.4115 (5.50)
Actopan Flores	Actopan	<0.0052 (3.40)	<0.0577 (1.75)	6.4420 (8.70)
Actopan Vainas	Actopan	<0.0052 (2.40)	<0.0577 (1.65)	8.4932 (4.65)
Actopan Frutos	Actopan	<0.0052 (2.00)	<0.0577 (40.35)	6.3033 (22.25)
<u>Maíz:</u>				
Actopan Raíz	Actopan	<0.0052 (1.70)	22.9672 (0.65)	5.3653 (15.40)
Actopan Tallo	Actopan	<0.0052 (1.95)	13.0745 (0.90)	5.3625 (6.50)
Actopan Hojas (Tallo)	Actopan	1.7322 (2.55)	9.8808 (1.50)	9.0537 (9.75)
Actopan Hojas (Mazorca)	Actopan	0.1498 (0.95)	16.2282 (0.65)	16.0282 (3.20)
Actopan Espigas	Actopan	<0.0052 (2.30)	0.9312 (1.45)	10.4180 (10.40)
Actopan Grano	Actopan	<0.0052 (12.95)	27.3883 (0.55)	20.1316 (3.50)
Actopan Olote	Actopan	<0.0052 (2.10)	<0.0577 (2.00)	10.4699 (15.95)

#### *Análisis de suelo “cero”*

Las evaluaciones en la muestra de suelo “cero” sólo contemplaron los análisis de textura por la técnica de Bouyoucos (Villegas et al., 1978). Los cálculos obtenidos se llevan al triángulo de clasificación de los suelos según textura (EPA, 1998).

Igualmente se sometió a una mineralización por horno de microonda (0.200 g de muestra previamente secada y tamizada), para cuantificar las concentraciones totales de los metales en estudio. Se siguieron los procedimientos realizados

en trabajos previos (Prieto et al., 2005a).

Todos los cálculos están realizados en base seca de las muestras. Todas las muestras fueron analizadas en réplicas (n=4) y calculados los porcentajes de desviación estándar relativa (%DER).

## Resultados y discusión

### *Metales por tipos de cultivos y suelos*

En la Zona se muestrearon nopales, magueyes, habas y maíz. Para los nopales y las muestras de maguey se trabajó solamente con la pulpa y la corteza, no así con las raíces, dado que se trató por todos los medios de no dañar los cultivos de los productores. Para el caso de las Habas y del Maíz, se pudo coleccionar de todas las partes de la planta, lo cual es un aspecto favorable para estudiar sus niveles de acumulación selectiva. En la Tabla 4 se recogen los resultados para los metales Cd, Cr y Pb para los cuatro cultivos mencionados. Como se puede apreciar, la mayoría de los cultivos no presenta concentraciones de Cd por encima del Límite de Detección Experimental (LDE), salvo en las muestras de nopal cultivados en las afueras de Actopan en suelos de serie tipo Progreso; aquí se observaron valores de Cd, tanto en cortezas como en pulpa de los cladidos, entre 5.02 y 10.94 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Lo anterior, resulta significativamente importante ya que ambas partes forman parte de la dieta tradicional, destacándose sobre todo la capacidad de acumulación en la pulpa, lo que puede ser debido a la mayor retención de agua en esta parte del cultivo y probablemente el Cd se encuentre asociado en complejos orgánicos.

Por otro lado, sólo se encontraron relativas bajas concentraciones de Cd (0.03 mg kg<sup>-1</sup>) en corteza de maguey; un poco más altas en raíces de habas (0.68 mg kg<sup>-1</sup>) y en hojas unidas a tallos y hojas unidas a mazorcas en el maíz (1.73 y 0.15 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente) y en esta misma población y misma serie de suelo. Esto es indicativo de que en esta área, los suelos presentan una mayor capacidad de retención para el Cd fácilmente disponible para los cultivos. Esta capacidad de retención puede estar asociada a la elevada capacidad de intercambio catiónico que muestran estos tipos de suelos (52.41 mol kg<sup>-1</sup>) y sus características de textura arcillo-arenosa (Lucho et al., 2005). La

única muestra que contiene Cd dentro de esta zona y que no es precisamente perteneciente a la municipalidad de Actopan, es la corteza de maguey del poblado Francisco Villa, en suelo de serie tipo Tepatepec cuya concentración fue de 0.20 mg kg<sup>-1</sup> lo cual también es considerado como una concentración relativamente baja.

De los resultados de Cr, se puede apreciar que no se detectó en nopales. En tanto, en magueyes se encontró una elevada concentración en los suelos de la municipalidad de Actopan, en la serie tipo Progreso, como únicos casos de este cultivo. Se reporta por Prieto et al. (2005a) que en suelos de las series tipos Progreso y Actopan, se presentan las más elevadas concentraciones de Pb y Cr que son fácilmente lixiviables. Sin embargo, debe destacarse que es mayor la acumulación en corteza (parte verde del cultivo) que en pulpa (23.71 y 7.63 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), lo cual, a diferencia del Cd, indica que el Cr se acumula de manera preferencial en estas partes del cultivo. Este comportamiento ha sido reportado por otros autores para diferentes plantas verdes (Kabata-Pendias y Pendias, 2000); donde señalan que puede ser debido a que se asocian en forma de complejos órgano-metálicos a la clorofila.

De igual manera se apreció que para los cultivos de habas, los resultados de Cr sólo mostraron una apreciable acumulación en raíces y tallos en este mismo poblado (20.31 y 14.91 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) y que para las restantes partes de este cultivo no fue detectado. Por su parte, para los cultivos de maíz, sí se detectaron cantidades considerables en todas las partes del cultivo, con la sola excepción del olote. Es de destacar que en los granos de elotes es donde se observaron las concentraciones más elevadas de Cr (27.39 mg kg<sup>-1</sup>), lo cual es indicativo de potenciales riesgos de toxicidad para quienes los consumen. La hoja que envuelve la mazorca también muestra apreciable acumulación, y debe señalarse que ésta es muy utilizada en la elaboración de tamales, constituyendo igualmente un riesgo potencial en estas condiciones.

El Pb merece una atención especial; como se observa en la Tabla 4, está omnipresente en todos los cultivos, y esto está en correspondencia con lo señalado por Corey y Galvão (1987). También se

Tabla 5. Contenido de As y Hg en cultivos de nopal, maguey, habas y maíz. Entre paréntesis aparecen los resultados de los % Desviación Estándar Relativa (%DER). LDE: para [As] mg kg<sup>-1</sup>, <0.0284 y para [Hg] mg kg<sup>-1</sup>, < 0.0075.

Muestra	Serie de Suelo	[ As ] mg kg <sup>-1</sup>	[ Hg ] mg kg <sup>-1</sup>
<u>Nopal:</u>			
Actopan Pulpa	Progreso	0.0908 (17.85)	0.0939 (3.00)
Actopan Corteza	Progreso	<0.0284 (56.10)	1.0213 (1.15)
Fco. Villa Pulpa	Tepatepec	0.5452 (5.15)	<0.0075 (0.85)
Fco. Villa Corteza	Tepatepec	0.6888 (5.40)	<0.0075 (4.80)
Ixmiquilpan Pulpa	Lagunilla	<0.0284 (4.70)	<0.0075 (7.80)
Ixmiquilpan Corteza	Lagunilla	<0.0284 (0.85)	0.1376 (5.45)
<u>Maguey:</u>			
Actopan Pulpa	Actopan	<0.0284 (40.15)	0.2913 (0.80)
Actopan Corteza	Actopan	<0.0284 (28.70)	0.4778 (1.70)
Lagunilla Pulpa	Lagunilla	<0.0284 (5.25)	<0.0075 (6.95)
Lagunilla Corteza	Lagunilla	<0.0284 (6.70)	<0.0075 (7.00)
Fco. VillaPulpa	Tepatepec	0.1037 (3.75)	0.4743 (3.20)
Fco. Villa Corteza	Tepatepec	0.1591 (6.40)	0.4296 (2.95)
Ixmiquilpan Pulpa	Lagunilla	<0.0284 (5.90)	<0.0075 (3.90)
Ixmiquilpan Corteza	Lagunilla	<0.0284 (9.30)	<0.0075 (7.45)
<u>Habas:</u>			
Actopan Raíz	Progreso	<0.0284 (3.45)	1.4505 (3.40)
Actopan Tallos	Progreso	<0.0284 (0.70)	0.3999 (3.05)
Actopan Hojas	Actopan	<0.0284 (6.00)	0.8340 (5.95)
Actopan Flores	Actopan	<0.0284 (76.65)	0.2174 (2.55)
Actopan Vainas	Actopan	<0.0284 (8.15)	1.0802 (3.15)
Actopan Frutos	Actopan	<0.0284 (26.85)	0.4279 (1.85)
<u>Maíz:</u>			
Actopan Raíz	Actopan	0.0413 (22.00)	0.1214 (2.00)
Actopan Tallo	Actopan	<0.0284 (2.85)	0.2366 (2.15)
Actopan Hojas (Tallo)	Actopan	<0.0284 (38.60)	0.1993 (2.70)
Actopan Hojas (Mazorca)	Actopan	<0.0284 (1.45)	0.1293 (1.80)
Actopan Espigas	Actopan	<0.0284 (30.60)	<0.0075 (1.95)
Actopan Grano	Actopan	0.1203 (15.15)	0.1416 (2.20)
Actopan Olote	Actopan	0.1046 (23.15)	0.2714 (2.90)

corresponde con la presencia de Pb en los suelos de la zona que han sido evaluados en otros trabajos (García et al., 1990; García et al., 2001; Lucho et al., 2005). En nopales y magueyes el Pb se acumula mayoritariamente en cortezas y posteriormente en pulpas. Pueden ser concentraciones de Pb

considerablemente elevadas teniendo en cuenta que los nopales son consumidos como alimentos directos y que las pencas de maguey se utilizan en partes o enteras, para cocer “barbacoa” y de ellas se extrae también el “mixiote”. Las más altas concentraciones se observaron en los poblados de

Actopan en suelos de serie tipo Progreso (11.11 mg kg<sup>-1</sup> en pulpas y 22.43 mg kg<sup>-1</sup> en cortezas) y en el poblado Francisco Villa en suelos de serie tipo Tepatepec (15.17 mg kg<sup>-1</sup> en pulpas y 17.54 mg kg<sup>-1</sup> en cortezas), mayores que en Ixmiquilpan, en series de suelos del tipo Lagunilla (6.57 y 7.17 mg kg<sup>-1</sup> en pulpa y corteza, respectivamente).

Para magüeyes en particular, resultaron elevadas las concentraciones de Pb en pulpas y cortezas cultivados en el poblado de Ixmiquilpan y en suelos de serie tipo Lagunilla. Esto refleja que diferentes cultivos muestran muy variadas formas o niveles de bioacumulación de los metales en estudio; por lo tanto, no existe una explicación única para los mecanismos de bioacumulación. Por otra parte, es razonable que la variedad de suelos según su textura, incide de tal manera que favorece una u otra forma de acumulación; así es el caso que en suelos de serie tipo Lagunilla, en la localidad de igual nombre, se obtuvieron las más altas concentraciones de Pb en magüeyes (22.86 y 29.58 mg kg<sup>-1</sup>, en pulpa y corteza respectivamente). Sin embargo, para esta serie de suelos los niveles de Pb acumulados y fácilmente lixiviables, no son los más elevados (Prieto et al., 2005a).

Para los cultivos de habas, en todas las partes del cultivo se presentaron concentraciones de Pb entre 6–12 mg kg<sup>-1</sup>. Los granos (fruto) resultaron los menos contaminados, siendo, sin embargo, cantidades significativamente importantes. De forma contraria para los cultivos de maíz, se observó niveles de concentraciones de Pb un poco más altas, entre 5–20 mg kg<sup>-1</sup>, y desafortunadamente, es en los grano y en hojas unidas a mazorcas donde se presentan los más altos niveles (20.13 y 16.03 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), siendo éstas las partes del cultivo destinadas al consumo humano. Las restantes partes del cultivo de maíz se emplean como rutina en forrajes de alimento para ganado.

De manera diferenciada, en la Tabla 5 se recogen los resultados de As y Hg en los mismos cultivos para esta zona. Se presentan de forma separada dado que en este trabajo es donde se reportan por vez primera resultados de estos elementos acumulados en cultivos del DR03. Aunque resultaron en bajas concentraciones, se pueden apreciar cantidades que pueden resultar de

importancia toxicológica y acumulativa de As y Hg (0.09 mg kg<sup>-1</sup> en ambos casos) en pulpas de nopales en la localidad de Actopan en suelos de serie tipo Actopan. También, se detectó Hg en la corteza del nopal en suelos de las series Actopan y Lagunilla, ésta última de los poblados de Ixmiquilpan. En las muestras de nopal del poblado de Francisco Villa se encontraron las concentraciones más elevadas de As (0.55 mg kg<sup>-1</sup> y 0.69 mg kg<sup>-1</sup> en pulpa y en corteza, respectivamente).

Para los cultivos de magüey, se pudo apreciar (Tabla 5) la presencia de cantidades significativas de Hg, tanto en pulpa como en corteza, mayores que las concentraciones encontradas de As. Las cantidades más elevadas de Hg en muestras de magüey correspondieron a la localidad Francisco Villa (serie tipo Tepatepec) y las de menor concentración a las muestras de Actopan (serie tipo Actopan), no encontrándose cantidades de Hg por encima del LDE en Ixmiquilpan ni en Lagunilla. Para el caso de As, solamente se encontró en el magüey de Francisco Villa en concentraciones de 0.10 mg kg<sup>-1</sup> para en caso de la pulpa y 0.16 mg kg<sup>-1</sup> en la corteza. Estos niveles de concentración de As encontrados en cultivos, son de 10–100 veces menores que los reportados para la región de Zimapán, zona altamente contaminada por As por presencia de materiales arsenicales de origen natural (Prieto et al., 200 b). Aunque en México no existe una norma que establezca niveles permisibles de As en cultivos, los valores encontrados resultan significativos, toda vez que se encuentran en el umbral de concentraciones permisibles en cultivos y granos, según la normatividad Argentina (Prieto et al., 2007), la que establece un máximo de 0.20 mg kg<sup>-1</sup>.

Para el cultivo de habas no se encontraron concentraciones de As mayores al LDE, pero los niveles de Hg que se encontraron en todas las partes del cultivo deben señalarse como significativos, y tales concentraciones oscilan entre 0.22 a 1.45 mg kg<sup>-1</sup>. Debe recordarse que este elemento es altamente tóxico y no está permitido en cultivos de consumo humano, teniéndose que en el grano (fruto) se presentan cantidades medias de 0.43 mg kg<sup>-1</sup>.

De forma similar ocurre con los cultivos de maíz en cuanto a concentraciones de Hg, pero en

Tabla 6. Contenido de Cd, Cr y Pb en cultivos de suelo cero, nopal y maguey (controles supuestos negativos). Entre paréntesis aparecen los resultados de los % Desviación Estándar Relativa (%DER). LDE: para [Cd] mg kg<sup>-1</sup>, <0.0052; para [Cr] mg kg<sup>-1</sup>, < 0.0577 y para [Pb] mg kg<sup>-1</sup>, < 0.0352

Muestra	Serie de Suelo	[Cd] mg kg <sup>-1</sup>	[Cr] mg kg <sup>-1</sup>	[Pb] mg kg <sup>-1</sup>
Suelo Cero	Progreso	1.0670 (5.73)	<0.0577 (1.53)	4.8678 (15.33)
Pulpa Nopal Cero	Progreso	<0.0052 (5.65)	<0.0577 (5.75)	<0.0352 (24.15)
Corteza Nopal Cero	Progreso	<0.0052 (13.70)	<0.0577 (12.60)	<0.0352 (27.00)
Pulpa Maguey Cero	Progreso	<0.0052 (7.55)	<0.0577 (20.15)	<0.0352 (16.20)
Corteza Maguey Cero	Progreso	<0.0052 (3.10)	<0.0577 (5.50)	<0.0352 (18.65)

Tabla 7. Contenido de As y Hg en Cultivos de Suelo, Nopal y Maguey Cero. Entre paréntesis aparecen los resultados de los % Desviación Estándar Relativa (%DER). LDE: para [As] mg kg<sup>-1</sup>, <0.0284 y para [Hg] mg kg<sup>-1</sup>, < 0.0075

Muestra	Serie de Suelo	[As] mg kg <sup>-1</sup>	[Hg] mg kg <sup>-1</sup>
Suelo Cero	Progreso	1.9760 (1.67)	0.7081 (7.37)
Pulpa Nopal Cero	Progreso	<0.0284 (6.75)	<0.0075 (8.25)
Corteza Nopal Cero	Progreso	<0.0284 (5.90)	<0.0075 (2.10)
Pulpa Maguey Cero	Progreso	<0.0284 (6.15)	<0.0075 (2.80)
Corteza Maguey Cero	Progreso	<0.0284 (5.50)	<0.0075 (2.50)

concentraciones un poco más bajas (0.12–0.27 mg kg<sup>-1</sup>). Así también, se detectaron concentraciones de As en raíz, granos y olotes, siendo la más alta las encontradas en granos (0.12 mg kg<sup>-1</sup>).

Es importante señalar que esta zona es la que tiene menos años de irrigación promedio y por tanto los niveles de acumulación de metales en los mismos estará asociada a los mayoritarios tipos de suelos arcillo-arenosos, donde se acumulan más fácilmente los metales asociados a las fracciones orgánicas aportadas por las aguas.

#### *Comparación de valores encontrados con muestras de suelo y cultivos cero*

Los resultados de las muestras consideradas como suelos o cultivos cero y regadas solamente con agua de pozo, se muestran en las Tablas 6 y 7. Se aprecian las cuantificaciones realizadas a las muestras de nopal y maguey, así como del suelo de cultivo. El estudio de textura practicado al “suelo cero” reveló que presenta características similares

al suelo de serie progreso, suelo sobre el cual se recogieron muchas de las muestras analizadas en el presente trabajo.

Se puede observar que ninguna de las muestras analizadas en los cultivos cero, presentó contenidos de Cd, Cr o Pb por encima del LDE. De lo anterior se deduce que, cuando existen concentraciones detectables de tales metales en cultivos para consumo humano, dichos cultivos tienen un cierto grado de contaminación asociado. Dicha contaminación puede deberse ya sea a motivos antropogénicos (como es el caso del DR03) o a una contaminación natural (ya sea por los componentes del suelo o agua de riego).

Aunque las concentraciones encontradas de Cd y Cr en las muestras del DDR 03, son significativas comparadas con los cultivos de suelo “cero”, si se puede afirmar que existe un problema serio de contaminación por Pb, que varía dependiendo de la región, del tipo de cultivo y de la variedad del cultivo, pues dentro de la zona de estudio se

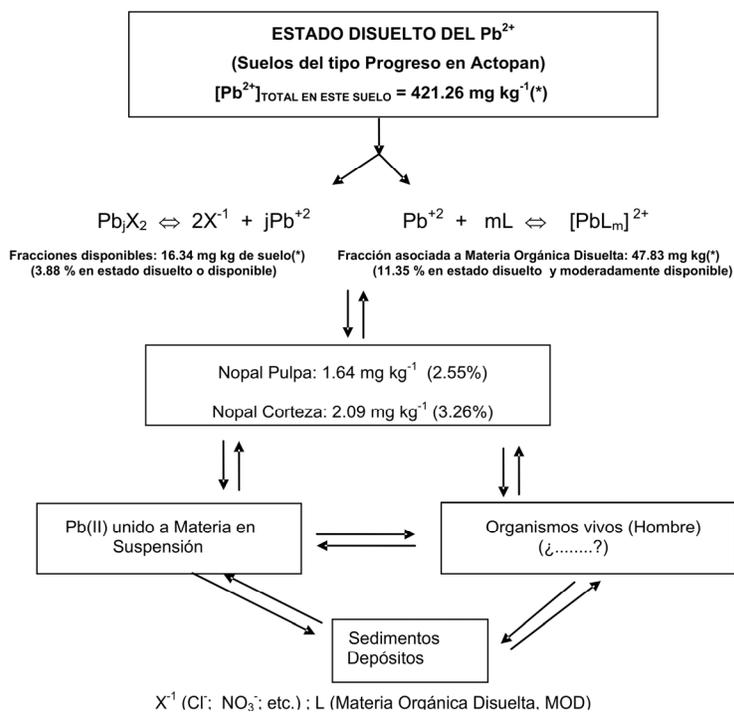


Figura 2. Probable ciclo de migración de alguna de las especies metálicas estudiadas. Ejemplo para el Pb<sup>2+</sup>.

encontró que se siembran, por ejemplo, alrededor de 15 variedades distintas de maíz. Cada variedad de cultivo presenta su propio metabolismo y por tanto distribuciones diferentes de metales bioacumulados a lo largo de sus tejidos. Se pudo apreciar que ciertos cultivos presentaron una tendencia a acumular mayor cantidad de Pb en hojas o tallos, mientras que otros acumularon más en raíz o frutos. Es obvio entender que las cantidades de metales bioacumuladas por los cultivos, se han derivado de las fracciones lábiles o disponibles (fácilmente lixiviables) en los suelos donde están cultivados. Así se puede entender cómo en el caso del Pb y Cd total encontrado en el suelo cero (34.87 mg kg<sup>-1</sup> y 1.07 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) no se encuentran en forma fácilmente lixiviable o disponible para los cultivos y que se encuentren probablemente formando parte de la composición mineral de la roca natural. Al igual que el caso de Cr, Cd y Pb, los contenidos

de As y Hg en las “muestras cero” fue menor al LDE, de tal manera que cualquier resultado por arriba de él puede considerarse como una contaminación, ya sea leve o severa, dependiendo de la magnitud de dicha concentración. Análogamente, las concentraciones de As y Hg encontrados en este suelo cero, no están en forma disponible para los cultivos.

#### Probables ciclos de migración de metales

De acuerdo a los resultados obtenidos, se ha planteado como una propuesta, el posible ciclo de migración de alguna de las especies metálicas estudiadas (Pb por ejemplo, como el elemento de mayores niveles encontrados), desde sus niveles detectados en suelos y aguas, hasta los niveles acumulados en cultivos específicos (nopal por ejemplo). A modo ilustrativo, se muestra en la Figura 2 un esquema del probable ciclo propuesto. En esta Figura se observa que el Pb<sup>2+</sup> encontrado

como fracción disponible (adsorbido o intercambiable) es de 16.34 mg kg<sup>-1</sup>, que representa el 3.88 % (m/m) del Pb<sup>2+</sup> total encontrado en estos suelos y que, unido a la fracción de Pb<sup>2+</sup> que se encuentra asociada a la materia orgánica (disponible en suelos y que es factible de lixiviar, aunque de manera mas lenta) que es de 47.8 mgkg<sup>-1</sup> y representa el 11.35 % del total encontrado en el suelo, hacen un total de Pb<sup>2+</sup> disuelto y disponible para los cultivos de 64.14 mg kg<sup>-1</sup>. En su caso se puede estimar que el nopal es capaz de absorber un 2.55 % (m/m) de esta cantidad en su pulpa y un 3.26 % (m/m) en la corteza.

### Conclusiones

Se encontraron concentraciones elevadas de Pb, razón por la cual es necesario emprender acciones con el fin de restaurar tanto como sea posible la calidad del agua de riego así como de los suelos sobre los cuales se siembran dichos cultivos. Para los restantes metales evaluados, se pueden considerar bioacumulaciones de nivel bajos, sin que esto reste importancia a los índices que se alcanzan para Pb y As. Aún hace falta mayor investigación respecto a los factores que rigen la bioacumulación selectiva de elementos traza en los cultivos, pues existe aún mucha controversia respecto a los mecanismos que gobiernan el paso de dichos elementos desde un medio contaminado hacia el interior de las plantas.

### Bibliografía

- Cepeda, J. M. 1999. Química de suelos, primera reimpresión. Editorial Trillas, México DF.
- CNA and BGS. 1995. Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Overseas Development Administration. México DF.
- EPA. 1998. Draft Risk Assessment for Cement Kiln Dust Used as an Agricultural Soil Amendment. Draft Report. Washington D.C. Reference DW 12938494-01-0.
- Galvão, L.A.C. y Corey, G. 1987. "Arsénico". Serie Vigilancia 8. Ed. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. Metepec, México. 103 pp.
- García V.G., Rubio, M., Del Razo, L., Borja, V. 2001. Lead Exposure in Children Living in a Smelter Community in Region Lagunera, Mexico. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 62: 417-429.
- García Z., A., Cruz-Díaz, J., Cajuste, L. 1990. "Contaminación por Pb, Cd y Cr en Suelos y Tejidos Vegetales de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo", *Memorias del 1er Simposio Nacional de Degradación del Suelo*, UNAM, México.
- Kabata-Pendias, A. 1995. Agricultural problems related to excessive trace metals contents of soil. In: *Concerning heavy metals: problems and solutions*. W. Salomons, U. Försther and P. Mader (Eds) Springer-Verlag, Berlin. pp. 19-31.
- Kabata-Pendias, A. y Pendias H. 2000. "Trace Elements in Soils and Plants", CRC Press LLC, Third Edition, Boca Raton, Estados Unidos.
- Lucho-Constantino, C. A., Prieto-García, F., Del Razo, L. M., Rodríguez-Vázquez, R. and Poggi-Varaldo, H. M. 2005. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108: 57-71.
- Maples, M. 1990. Antecedentes físicos, históricos y socioeconómicos del distrito de desarrollo rural 063, Estado de Hidalgo. Primer Simposio Nacional. Degradación del Suelo. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Memorias. México DF, México, 65-68.
- Mejía Barrón, M., Sánchez, S., Hernández, G., Flores, L., Villareal, G. y Guajardo, R. 1990. "Metales Pesados en Maíz (*Zea mays* L) y Alfalfa (*Medicago sativa* L.) y su correlación con extractables en suelos del DDR 063, Hgo.", *Memorias del 1er Simposio Nacional de Degradación del Suelo*, UNAM, México.
- Méndez, G.T. 1982. Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo, por A.B.S., boro y metales pesados, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Tesis de Maestría. México DF, México, 43-45.
- Prieto García, F., Lucho Constantino C.A., Poggi Varaldo H., Alvarez Suárez, M. y Barrado Esteban, E. 2005a. Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Argentina* 83 (6): 96-102.
- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Lechuga Vargas, M. A., Gaytán Oyarzún, J.C. y Barrado Esteban, E. 2005b. Acumulación en tejidos vegetales de arsénico provenientes de aguas y suelos de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Revista BIOAGRO*, 17: 129-135.
- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Román Gutiérrez, A.D., Prieto Méndez, J. y Beltrán Hernández, R.I. 2007. Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Argentina*, 38: 96-102.
- SARH. 1980. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Boletín Hidrológico No.45, Región Hidrológica No. 26 (Informe parcial) (Cuenca del río Tula). Subsecretaría de Planeación. 74 pp.
- Villegas, S.M., Aguilera, H.N. y Flores, D.L. 1978. Método Simplificado de Análisis para la Clasificación Granulométrica de los Minerales del Suelo. *Revista Internacional de Geología-UNAM*, 2: 19.