

CONCENTRACIÓN DE Pb, Cd, Ni y Zn EN SUELOS CONTAMINADOS Y SU TRANSFERENCIA A LA PELLA DE BRÓCOLI

Concentration of Pb, Cd, Ni, and Zn in Polluted Soils and their Transference to Broccoli Heads

Ma. Antonia Pérez Olvera^{1‡}, Rosario García Mateos^{1,2}, Antonio Vázquez Alarcón³,
Teresa Colinas León¹, Mario Pérez Grajales¹ y Hermilio Navarro Garza^{1,4}

RESUMEN

Se cuantificó por espectrofotometría de absorción atómica: Pb, Cd, Ni y Zn, en suelos y pellas de brócoli extraídos con EDTA 0.05 M pH 7.0 relación suelo:solución extractora (p/v) 4:1 para suelo y por digestión húmeda para material vegetal. Las muestras se tomaron en 28 parcelas irrigadas con agua proveniente de diversas fuentes: tratada del canal de las chinampas (TCC); tratada sitio de salida 1 y 2 (TS1 y TS2); canal principal y secundario (TCPYS); tratada mezclada con negra (T + N); residual del drenaje local (DL) y blanca o testigo (BCA). Se estimaron las tasas de transferencia suelo-pella y se determinó pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), N y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelo. Los suelos presentaron concentraciones de Zn, Pb, Ni y Cd que varían de 1.90 a 11.02, 3.74 a 6.42, 0.65 a 1.36 y 0.08 a 0.27 mg kg⁻¹, respectivamente, dependiendo de la ubicación y de la fuente de agua utilizada para su riego. Para las pellas las concentraciones van de 30.60 a 47.16, de 0.8 a 4.49, de 0.77 a 1.03 y de 0.5 a 4.51 mg kg⁻¹ para Zn, Pb, Ni y Cd, respectivamente. Las concentraciones en pella fueron superiores a las del suelo sobre todo para Cd, Ni y Zn, lo que significa que, además del suelo, hay otras fuentes de estos metales para el cultivo. Existe un alto grado de correlación entre las características químicas de los suelos (MO, N y CIC) y la concentración de metales pesados en el suelo y en la pella de brócoli. La concentración de Zn en la pella está dentro del intervalo normal que se establece para este cultivo. La ingesta de Pb y Cd es inferior a la establecida

por la FAO/OMS, considerando un consumo per cápita estimado de 2.8 kg por habitante por año.

Palabras clave: Brassica oleraceae, metales pesados, tasas de transferencia, contaminación, riego con aguas residuales.

SUMMARY

Pb, Cd, Ni, and Zn concentration was quantified through atomic absorption spectrometry in soils and broccoli heads extracted with EDTA 0.05 M pH 7.0 ratio soil:extraction solution (w/v) 4:1 for soils and by wet digestion for plant tissue. Samples were taken from 28 plots irrigated with water under different management and from different origins: treated from the «chinampas» canal (TCC); treated at exit point 1 and 2 (TS1 and TS2); treated from main and secondary canals (TCPYS); treated mixed with sewage sludge (T+N); residual from local drainage (DL), and a fresh water control (BCA). Soil-broccoli head transference ratios were estimated, and pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), N, and cation exchange capacity (CEC) in soil were analyzed. Concentrations of Zn, Pb, Ni, and Cd in soils ranged from 1.90 to 11.02, 3.74 to 6.42, 0.65 to 1.36, and 0.08 to 0.27 mg kg⁻¹, respectively, depending on location and irrigation water source. In broccoli heads, concentrations ranged from 30.60 to 47.16, from 0.8 to 4.49, from 0.77 to 1.03, and from 0.5 to 4.51 mg kg⁻¹ for Zn, Pb, Ni, and Cd, respectively. The concentrations of Cd, Ni, and Zn in the broccoli head are greater than those found in the soil, which indicates that in addition to soil there are other sources of these metals in the crop. There is a high degree of correlation among chemical characteristics of soils (OM, N, and CEC) and concentration of heavy metals in soil and broccoli heads. The Zn level in heads is within the range established for this crop. Uptake of Pb and Cd is below the level established by the FAO/WHO, considering an estimated consumption per capita of 2.8 kg per year.

¹ Departamento de Fitotecnia, ² Departamento de Preparatoria Agrícola, ³ Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (molvera@colpos.mx)

⁴ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

Index words: Brassica oleracea, heavy metals, transference ratios, contamination, wastewater irrigation.

INTRODUCCIÓN

La reutilización de las aguas residuales es una práctica mundialmente extendida. Garza (2000) encontró dos grandes motivos: una actitud conservacionista y, otra, desde el punto de vista sanitario acorde con un pensamiento de protección al ambiente, donde países como Alemania, Australia, Canadá, España o Estados Unidos le dan un tratamiento purificador al agua residual y luego la reciclan en pequeñas cantidades. En estos países el agua se utiliza en cuerpos de agua superficiales, riego de áreas verdes y de cultivos que no representan riesgo para consumo humano. En otros casos el agua se emplea para la supervivencia o el desarrollo, como Brasil, Chile, India, Israel, Marruecos, México o Perú, donde el agua residual tratada y sin tratar se reutiliza en actividades agrícolas o acuícolas, fomentando así el desarrollo local o regional.

El agua residual tratada y sin tratar es una fuente de riego y de nutrimentos para los cultivos; entre los nutrimentos que aporta se encuentran el N, P y K, lo que permite a los agricultores reducir, y a veces eliminar, el uso de fertilizantes. La actividad agrícola en algunas Delegaciones del Distrito Federal y varios municipios en el Estado de México e Hidalgo depende, en gran medida, de las aguas residuales tratadas y sin tratar que se producen en la zona metropolitana de la ciudad de México.

La actividad agrícola en Mixquic es importante desde el punto de vista económico y ecológico, genera recursos y empleo; los cultivos que destacan son: el brócoli (*Brassica oleraceae*) y el romerito (*Suaeda difussa*), sobre todo por la superficie cultivada. El primero, con producción de hasta 100 Mg d⁻¹ en verano, representa cerca del 30% del brócoli que se distribuye en la Central de Abasto del Distrito Federal. El segundo es un producto endémico de la región, que se comercializa en dos épocas del año (semana santa y navidad) (INEGI, 1993). Ambas especies son irrigadas con agua tratada proveniente de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella, esta agua se mezcla en algunos sitios con aguas residuales sin tratar provenientes del Canal de Chalco y del drenaje local, lo que confiere ciertas limitaciones para su uso. La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGOH,

2000) reporta que dicha agua contiene Pb y Cr en concentraciones de 0.069 y 0.056 mg L⁻¹, respectivamente, mientras que el Na se encuentra en 75.72 mg L⁻¹, HCO₃⁻ y Cl⁻ en concentraciones de 165.96 y 57.16 mg L⁻¹, respectivamente, lo que, a largo plazo, puede constituir un problema de contaminación del suelo y de los productos agrícolas que se obtienen al regar con esa agua.

Páez *et al.* (1995) mencionan que los organismos expuestos a metales pesados pueden acumularlos en sus tejidos a concentraciones más altas que las que normalmente se encuentran en el ambiente. Iretskaya y Chien (1999) mencionan que los metales pesados pueden ser transferidos a las partes comestibles de los cultivos y que la capacidad de absorción es variable, así mismo mencionan que las cantidades mayores de metales pesados se acumulan en las hojas. Los mismos autores señalan que los contenidos más bajos se encuentran en las semillas y que la absorción de metales pesados por las plantas, sobre todo Cd y Pb, varía dependiendo del pH del suelo.

Los metales tienden a acumularse en la superficie del suelo quedando accesibles al consumo de las raíces de los cultivos (Baird, 1999). La persistencia de metales pesados en los suelos es mucho mayor que en cualquier otro medio de la biosfera, la cual resulta virtualmente permanente (Méndez *et al.*, 2000). Ramos *et al.* (2001) mencionan que los metales acumulados en la superficie del suelo disminuyen lentamente, debido al consumo por las plantas y la erosión, entre otros procesos.

Puschenreiter *et al.* (1999) concluyen que los suelos urbanos con bajos niveles de contaminación de metales pesados pueden ser usados sin riesgos para la horticultura y la agricultura, si se toman las debidas precauciones; por el contrario, Birley y Lock (1998) argumentan que se sabe muy poco sobre el efecto crónico en la salud por el consumo de pequeñas cantidades de metales pesados y, por lo tanto, se necesita mayor investigación.

McBride (1995) menciona que debido a la toxicidad de ciertos metales pesados y elementos traza para las plantas y los animales que los consumen hace necesario que se realicen estudios a través del tiempo para evitar cualquier tipo de riesgo ambiental. Walter *et al.* (2003) fundamentan que la determinación de metales pesados totales en el suelo puede ser una variable útil para estimar su grado de contaminación; sin embargo, para evaluar posibles riesgos sugieren la cuantificación de la fracción extractable.

El aspecto de los metales pesados se ha convertido en un tema actual desde el punto de vista ambiental, así como de salud pública, debido a que los daños que causan son severos, aunque en la mayoría de las ocasiones ausentes de síntomas. Pese a esto, las autoridades ambientales y de salud, en los últimos años han puesto su atención en minimizar la exposición de la población a estos metales tóxicos, en particular de la población infantil (Valdés y Cabrera, 1999).

Ramos *et al.* (2001) reportan la presencia de metales pesados en suelos de chinampa de la zona de Tláhuac en la secuencia siguiente: Pb, Ni, Zn, Cu, Cr y Cd, y concluyen que los metales pesados, sales y Na tienden a concentrarse en la parte superficial del suelo, así como en los cultivos, cuando el riego por aspersión con agua de los canales que rodean a las chinampas se practica durante largos periodos de tiempo.

De esta manera, en países desarrollados, como Estados Unidos y los países europeos, se han establecido normas y límites máximos permisibles de estos compuestos en los productos de consumo humano y animal, los cuales son evaluados como mecanismo de control de calidad en los productos que importan de otros países.

En un estudio realizado en las áreas periurbanas de la ciudad de México que incluye Mixquic, Quintos y Quispe (2004) enfatizan la falta de información y de estudios en la zona, y concluyen que es necesario realizar investigación sobre la calidad de los suelos y del agua, del impacto ambiental y de los sistemas de producción.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) cuantificar las concentraciones de Zn, Pb, Cd y Ni en suelo y pella de brócoli, 2) determinar las tasas de transferencia de dichos metales, desde el suelo hacia la pella, y 3) evaluar un escenario de riesgo en relación con el consumo per cápita del brócoli en función de los límites permisibles de consumo de cada metal.

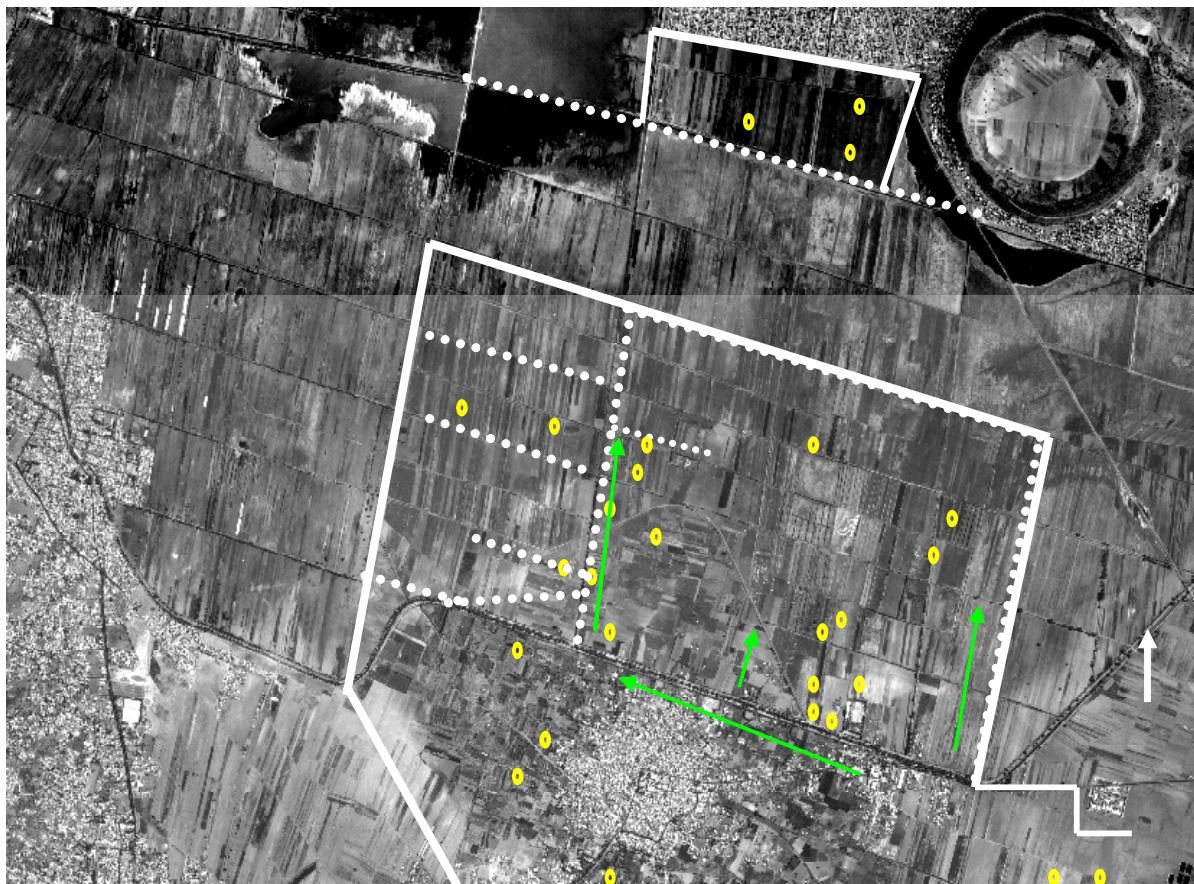
MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la comunidad de Mixquic, Tláhuac, ubicada al sureste de la ciudad de México, a una altitud de 2240 m, 19° 13' 28" N y 98° 57' 51" O. Los tipos de suelo presentes en el ejido son de tipo Gleysol háplico y Luvisoles éutricos (INEGI, 1980).

Se seleccionaron 28 parcelas de productores, de aproximadamente 1 ha cada una (Figura 1), cultivadas

con brócoli e irrigadas con aguas tratadas provenientes de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella, o bien, con agua tratada proveniente del mismo sitio, pero mezcladas con aguas residuales del canal de Chalco o con aguas del drenaje local; se analizó también una parcela de observación cultivada con brócoli en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, irrigada con agua potable, como testigo. Considerando la fuente de agua y la ubicación de los mismos en el ejido como una fuente de variación importante, los tratamientos analizados incluyen las modalidades de uso de las aguas y la posible variación en la calidad química de la misma, debida a su origen y manejo. Al combinar dichas variables se tienen sitios de muestreo con los siguientes tratamientos y repeticiones: 1) Agua tratada canal chinampa (TCC), corresponde a agua proveniente de la planta de tratamiento, pero que permanece estancada en los canales, de donde es bombeada hacia las parcelas. 2) Agua tratada sitio de salida 1 (TS1), directamente del tubo de salida ubicado cerca de los canales secundarios. 3) Agua tratada sitio de salida 2 (TS2), corresponde a agua tratada, pero que ocasionalmente se utiliza agua sin tratar proveniente del canal de Chalco. 4) Agua tratada canal principal y secundario (TCPYS), la cual corresponde a agua tratada almacenada y conducida por los canales principal y secundario de la zona del ejido. 5) Agua tratada mezclada con agua residual sin tratar (T + N). 6) Agua del drenaje local (DL), corresponde a aguas del drenaje local o residuales sin tratar. 7) Agua de pozo (BCA), correspondiente a un sitio testigo, tratamiento ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo. El número de repeticiones en cada uno de los tratamientos de acuerdo con los resultados del muestreo fueron: 5, 5, 5, 3, 5, 4 y 1 sitios, respectivamente.

Las muestras de suelo para la determinación de metales pesados se tomaron mediante un muestreo estratificado, considerando como estrato el tipo de agua empleada para el riego. Las muestras compuestas de suelo se constituyeron a partir de cinco submuestras por sitio (1 ha, aproximadamente), tomadas a una profundidad de 0 a 30 cm, mediante un muestreo en zigzag. Dichas submuestras se mezclaron y homogeneizaron para constituir una muestra compuesta representativa de la parcela de interés. Las muestras se secaron a la sombra, posteriormente se molieron y se tamizaron en malla 10. El análisis de las muestras se hizo por duplicado y por cada 10 muestras se puso una tercera repetición para



Fuente: Elaboración personal a partir de ortofotos digitales E14B41a y E14B31d, con base en fotografías aéreas escala 1:75 000, INEGI (1999). Ubicación y verificación de parcelas de muestreo en campo.

Figura 1. Delimitación del ejido de Mixquic, D. F. (línea blanca continua), ubicación de los sitios de muestreo (círculos), canales de agua tratada (línea punteada) y canales de agua residual sin tratar (flechas).

control. Los metales pesados se extrajeron con EDTA 0.05 M pH 7.0 (Westerman, 1990) en una relación suelo:solución extractora 4:1 (p/v).

Las variables analizadas fueron: pH (medido con potenciómetro en la suspensión sobrenadante de una mezcla suelo:agua relación 1:2), conductividad eléctrica (CE) (del extracto de saturación mediante puente de conductividad), materia orgánica (MO) (Walkley y Black), nitrógeno (microkjeldahl), carbonatos totales (método de neutralización ácida) y capacidad de intercambio de cationes (CIC), empleando acetato de amonio pH 7.0 como solución saturante (MAFF, 1986).

Las muestras de material vegetal se integraron a partir de una muestra de entre 5 y 8 pellas de brócoli que se tomaron en el momento de la cosecha, en el mismo sitio donde se colectaron las muestras de suelo; las pellas se colectaron, fraccionaron, y secaron en estufa a

una temperatura de 70 °C hasta alcanzar peso constante, posteriormente se molieron finamente en mortero.

La extracción de metales en las pellas de brócoli se hizo por duplicado, mediante una digestión en húmedo con ácido nítrico y perclórico en una relación 1:1 (Bradford *et al.*, 1975). Por cada 10 muestras se puso una tercera repetición como control y se utilizó almidón como blanco. La cuantificación de metales pesados se realizó por espectrofotometría de absorción atómica, en un equipo de absorción atómica Perkin Elmer. La toma de muestras, el manejo, la preparación y el análisis de las mismas se realizó considerando las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana (NOM) NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAP, 2000), que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. El agua utilizada

fue desionizada y los reactivos utilizados fueron de grado analítico.

Las tasas de transferencia se calcularon mediante el cociente que resulta al dividir la concentración del metal en la planta y la concentración del metal encontrada en el suelo, ambas expresadas en mg kg^{-1} (Vázquez *et al.*, 2005). El análisis se realizó mediante análisis de correlación y estadística básica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los Suelos

El pH de los suelos es alcalino, con un promedio de 8.21, lo cual coincide con lo encontrado por Ramos *et al.* (2001), quienes reportan valores de pH de suelo de 8.3 y 8.5 para la capa arable (0-30 cm) en suelos de Tláhuac. Así mismo, es importante señalar que en suelos calcáreos y con pH elevado la probabilidad de que los elementos traza se lixivien hacia las aguas subterráneas es muy baja, ya que dichas condiciones de los suelos favorecen la inmovilización. Rostagno y Sosebee (2001) mencionan que la CE presenta valores entre 1.91 y 5.14 dS m^{-1} . El valor más alto corresponde al suelo irrigado con agua proveniente del canal de las chinampas (TCC).

Los valores de MO, P, N y la CIC se presentan en el Cuadro 1. Destaca que la concentración de MO es alta, con valores que van de 7.67 hasta 13.4%, los cuales corresponden a los tratamientos DL y TCC, respectivamente. Tales valores pueden deberse a la práctica de aplicación de abono orgánico o de sedimentos de los canales (tierra amarilla) en el sitio donde va a ser cultivada la plántula de brócoli, práctica conocida localmente como mateado, la cual ha permitido evitar problemas con la salinidad del suelo y ha proporcionado

nutrimentos al cultivo. El análisis estadístico para MO muestra diferencias significativas, presentándose tres grupos de medias: en el Grupo 1 con las mayores concentraciones de MO e igualdad estadística se ubican los Tratamientos 1, 3 y 4, que corresponden a sitios irrigados con: agua del TCC, agua tratada del Sitio de salida 1 y agua tratada de los canales principal y secundario, respectivamente; el Grupo 2 lo constituyen los Tratamientos 5, 2 y 6 que corresponden a parcelas irrigadas con agua tratada del Sitio de salida 2, tratada mezclada con agua negra o residual; y el tercer grupo corresponde a sitios irrigados con agua de drenaje local. El tratamiento testigo (sitio irrigado con agua de pozo o blanca) presentó la concentración de MO más baja constituyendo el tercer grupo de medias.

La concentración de N total en los suelos varía de 0.32 a 0.67%, respecto al testigo con 0.06%, superado en todos los casos por los tratamientos. Considerando el análisis estadístico, el N presentó una tendencia similar a la de la MO.

La concentración de P de todos los tratamientos, incluyendo al testigo, es alta acorde con la clasificación para P extractable Olsen (CSTPA, 1980), la cual establece un valor superior a 11 mg kg^{-1} para esta categoría. El análisis estadístico no muestra diferencias estadísticas en la concentración de MO en los suelos evaluados. Lo anterior se debe, en parte, a los aportes de MO y a complementos de fertilización que los productores regularmente realizan.

La CIC de los suelos es alta (27.75 a 40.55 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$). De acuerdo con la clasificación de Cottenie (1980), estos valores corresponden a una alta CIC, lo que refleja una mayor capacidad de los suelos para mantener una reserva de nutrimentos para las plantas. El análisis estadístico muestra tres grupos de medias:

Cuadro 1. Contenido de materia orgánica (MO), nitrógeno total estimado (N), fósforo (P) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos cultivados con brócoli e irrigados con diferentes fuentes de agua.

Tratamiento [†]	Número de muestras	MO ----- % -----	N total estimado	P mg kg^{-1}	CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$
Tratada canal chinampa (TCC)	5	13.40 a [‡]	0.67 a	58.3 a	40.55 a
Tratada sitio de salida 1 (TS1)	5	10.59 a	0.53 a	53.5 a	31.47 b
Tratada sitio de salida 2 (TS2)	5	8.13 b	0.41 b	54.9 a	28.89 b
Tratada canal principal y secundario (TCPYS)	3	9.41 a	0.47 a	30.8 a	28.37 b
Tratada + negra (T + N)	5	8.91 b	0.45 b	37.9 a	27.75 b
Drenaje local (DL)	4	7.67 b	0.32 b	45.9 a	28.89 b
Agua de pozo o blanca (BCA)		1.11 c	0.06 c	21.5 a	11.87 c

[†] Sitios de cultivo de brócoli irrigado con el tipo de agua especificado. [‡] Medias con la misma letra presentan igualdad estadística (Tukey, $\alpha = 0.05$).

en el primer y con el valor más alto el tratamiento correspondiente a los suelos irrigados con agua del canal de la chinampa, el segundo grupo con igualdad de tratamientos agrupa al resto de los tratamientos excepto al testigo, el cual, de manera individual, constituye el Grupo 3 con una CIC de $11.90 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

El tratamiento TCC fue el que presentó los valores más altos en todas las variables evaluadas, lo cual se debe al aporte tan intenso de sedimentos y MO que en el año se realizan durante los ciclos de cultivo. Jiménez y Nuñez (1993) encontraron que en el sistema de chinampas existe una intensa rotación de cultivos durante el año, lo que lo hace un sistema intensivo de incorporación de MO a partir de los residuos de cosecha (raíz del cultivo y de las malezas, y restos del cultivo anterior), los cuales pueden constituir un aporte de hasta $2000 \text{ a } 3000 \text{ kg ha}^{-1}$ en un ciclo (Pérez *et al.*, 2000), así como la entrada de sólidos, a partir de los lodos de los canales utilizados para construir los almácigos y el cepellón de las plántulas de las hortalizas y los que pueda aportar el agua de los canales de las chinampas.

Contenido de Metales Pesados en Suelo y Pella de Brócoli

En el Cuadro 2 se muestran las concentraciones promedio de los metales analizados en las muestras de suelo. En orden de importancia, de acuerdo con las concentraciones encontradas, la secuencia fue $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cd}$. Los valores de Zn más altos corresponden a los Tratamientos TCC y TS1, el resto de los tratamientos presentan valores muy similares debido, seguramente, a que el Zn puede provenir de las fuentes de agua, pero

también influye la fertilización, sobre todo de tipo foliar, con micronutrientes, que se emplea regularmente en el cultivo de romerito, segundo cultivo más importante en la zona. El Pb presenta una tendencia similar, sin embargo, además de la zona de chinampas, se incluye a los Tratamientos TS1 y TS2, correspondientes a las dos importantes salidas de agua tratada. El Cd y el Ni presentan valores similares entre los tratamientos, pero en todos los casos superiores al testigo. Los valores en los tratamientos fluctúan sin considerar al testigo para Zn, Pb, Ni y Cd de 1.90 a 11.02, de 3.74 a 6.42, de 0.65 a 1.36 y de 0.08 a 0.27 mg kg^{-1} , respectivamente, y son en todos los casos superiores al testigo.

Las concentraciones de Zn y Pb son superiores a las reportadas por Ramos *et al.* (2001), quienes encontraron valores de 1.93 a 5.59 mg kg^{-1} y de 0.71 a 4.70 mg kg^{-1} para Zn y Pb, respectivamente, pero ocurre lo contrario con Cd y Ni que son inferiores a las reportadas por estos autores en suelos de la zona de Tlahuac y Xochimilco: 0.50 a 0.66 mg kg^{-1} y 1.56 a 2.64 mg kg^{-1} para Cd y Ni, respectivamente, en los primeros 30 cm de suelo. Dicho trabajo constituye uno de los pocos estudios en la zona referente a esta temática.

El contenido de Zn, Pb, Cd y Ni en pella de brócoli se muestra en el Cuadro 3. La secuencia en la cantidad de metales encontrada fue igual a la encontrada en el suelo: $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cd}$, los valores fluctuaron, sin considerar al testigo, de 29.42 a 43.68, de 2.35 a 4.49, de 2.46 a 4.51 y de 0.78 a 1.03 mg kg^{-1} , respectivamente.

Las concentraciones de Pb, Cd y Ni en el testigo (BCA) fueron inferiores al resto de los tratamientos; sin embargo, el contenido de Zn fue superior. Con esto se deduce que la fuente de Zn no es sólo el agua, sino

Cuadro 2. Concentración de metales pesados extractables en EDTA en suelo de 28 parcelas cultivadas con brócoli, en Mixquic, D. F.

Tratamiento [†]	Número de muestras	Zn	DS [‡]	Pb	DS	Cd	DS	Ni	DS
		mg kg^{-1}		mg kg^{-1}		mg kg^{-1}		mg kg^{-1}	
Tratada canal chinampa (TCC)	5	11.02 a [§]	2.04 a	6.42 a	2.220	0.27 a	0.100	0.65 a	0.604
Tratada sitio de salida 1 (TS1)	5	2.89 b	2.72 a	4.36 ab	0.749	0.12ab	0.090	1.09 a	0.706
Tratada sitio de salida 2 (TS2)	5	6.08 b	3.69 a	4.38 ab	0.965	0.18ab	0.100	1.06 a	0.758
Tratada canal principal y secundario (TCPYS)	3	1.90 b	0.72 b	3.74 b	1.180	0.08b	0.015	1.34 a	0.371
Tratada + negra (T + N)	5	2.35 b	1.04 a	3.90 ab	0.538	0.09ab	0.005	1.36 a	0.219
Drenaje local (DL)	4	3.96 b	2.09 a	3.93 ab	0.692	0.14ab	0.097	1.10 a	0.552
Agua de pozo o blanca (BCA)	1	1.27 b	-	2.12 b	-	t	-	t	-

[†] Sitios de cultivo de brócoli irrigado con el tipo de agua especificado; [‡] DS = desviación estándar; [§] Medias con la misma letra presentan igualdad estadística (Tukey, $\alpha = 0.05$). - = sin dato; t = trazas.

Cuadro 3. Concentración de metales pesados en pella de brócoli en el momento de la cosecha.

Tratamiento [†]	Número de muestras	Concentración de metales en pella de brócoli			
		Zn	Pb	Cd	Ni
----- mg kg ⁻¹ -----					
Tratada canal chinampa (TCC)	5	30.60	4.49	1.02	4.51
Tratada sitio de salida 2 (TS2)	5	34.88	2.46	0.83	3.89
Tratada sitio de salida 1 (TS1)	5	24.33	3.77	0.78	2.90
Tratada canal principal y secundario (TCPYS)	3	29.42	2.80	0.91	2.46
Tratada + negra (T + N)	5	32.03	3.53	1.03	3.66
Drenaje local (DL)	4	43.68	2.35	0.93	4.06
De pozo o blanca (BCA)	1	47.16	0.80	0.77	0.50

que existe un aporte importante vía fertilización foliar, actividad común por parte de los productores.

Las tasas de transferencia presentan variaciones de 3.7 a 11.4, de 2.7 a 15.5, de 1.8 a 7.0 y de 0.5 a 0.9 para Cd, Zn, Ni y Pb, respectivamente, sin considerar al testigo (Cuadro 4). Dichos valores son superiores a los factores de transferencia encontrados por Vázquez *et al.* (2005) para Cd, Ni y Pb, los cuales varían de 0.028 a 0.071, de 0.069 a 0.153 y de 0.110 a 0.305, respectivamente, para cultivos básicos (trigo, maíz, frijol y calabaza) en la zona del Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo. Así mismo son superiores a los calculados por el mismo autor con datos de Kabata-Pendias y Pendias (1984), con la consideración de que la tasa de transferencia fue calculada en condiciones donde no se presentó antes contaminación del suelo por Cd, Ni y Pb.

Es importante considerar que la transferencia de los metales es variable y depende de las condiciones del suelo, el tipo de cultivo y la parte de la planta que se evalúe.

Análisis de Correlación

En el Cuadro 5 se presentan los resultados del análisis de correlación entre las diferentes variables evaluadas. Destaca el alto grado de asociación entre MO, N y CIC, con todas las variables evaluadas, a excepción de CIC vs. Ni en suelo y CIC vs. Zn en pella, las cuales no son significativas. La concentración de P se asocia con Pb y Ni en pella y con Zn, Pb y Cd en suelo. En general, se encontró correlación entre las propiedades químicas de los suelos con la concentración de metales en el suelo y en la pella de brócoli. Spiro y Stigliani (2003) mencionan que la concentración de MO, arcillas y carbonatos, y los procesos de los cuales ellos se derivan son las principales características que controlan los procesos para la retención y/o disponibilidad de los metales pesados en el suelo, razón por la cual se encuentran correlacionados.

De la correlación entre la cantidad de metales pesados en el suelo y en la pella, se tiene que: la concentración de Pb y Cd en el suelo tiene

Cuadro 4. Tasa de transferencia de metales pesados suelo-pella de brócoli en Mixquic, D. F.

Tratamiento [†]	Número de muestras	Tasa de transferencia pella-suelo			
		Zn	Pb	Cd	Ni
----- mg kg ⁻¹ -----					
Tratada canal chinampa (TCC)	5	2.7	0.7	3.7	7.0
Tratada sitio de salida 1 (TS1)	5	8.4	0.8	6.3	2.6
Tratada sitio de salida 2 (TS2)	5	5.7	0.5	4.7	3.6
Tratada canal principal y secundario (TCPYS)	3	15.5	0.7	10.9	1.8
Tratada + negra (T + N)	5	13.6	0.9	11.4	2.6
Drenaje local (DL)	4	11.0	0.5	6.8	3.7
Agua de pozo o blanca (BCA)	1	37.1	0.3	77.0	15.6

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre variables químicas del suelo, con metales pesados en suelo y en pella de brócoli.

	MO [†]	N	Pella	CIC [‡]	Zn-p [§]	Pb-p	Cd-p	Ni-p	Zn-s [¶]	Pb-s	Cd-s
MO	1										
N	0.99	1									
Pella	0.76	0.73	1								
CIC	0.97	0.95	0.83	1							
Zn-p	-0.8	-0.85	-0.49	-0.68	1						
Pb-p	0.96	0.96	0.7	0.91	-0.82	1					
Cd-p	0.56	0.53	0.21	0.57	-0.19	0.59	1				
Ni-p	0.79	0.74	0.82	0.87	-0.38	0.72	0.65	1			
Zn-s	0.64	0.63	0.76	0.74	-0.216	0.58	0.43	0.694	1		
Pb-s	0.91	0.9	0.85	0.96	-0.58	0.87	0.55	0.828	0.89	1	
Cd-s	0.8	0.78	0.88	0.89	-0.39	0.72	0.47	0.844	0.95	0.96	1
Ni-s	0.56	0.53	0.29	0.49	-0.59	0.49	0.4	0.562	-0.11	0.26	0.15

[†] MO = materia orgánica; [‡] CIC = capacidad de intercambio de cationes; [§] p = pella; [¶] s = suelo.

una asociación significativa con todas las variables evaluadas, excepto Cd en suelo con Zn y Cd en pella. Otras asociaciones significativas son las que resultan entre Pb con Cd y Ni en pella y con Zn en suelo. Adicionalmente, Cd con Ni en pella y Ni en pella con Zn en suelo. Estos resultados coinciden con los encontrados por Ramos *et al.* (2001) quienes concluyen que existe una correlación positiva entre la concentración de metales pesados disponibles, CIC y MO, entre otros. Colombo *et al.* (1998) comentan que tanto la distribución de los metales, como su disponibilidad están controladas por propiedades intrínsecas del metal y las características de los suelos. Así mismo, Hooda y Alloway (1994) mencionan que los metales pesados extraídos con EDTA y DTPA se correlacionan de forma razonable con el contenido de dichos elementos en la planta.

La correlación negativa existente entre la concentración de MO en el suelo y el Zn puede explicarse considerando dos factores: el pH alcalino de los suelos, el cual tiene influencia en la disponibilidad de los metales y por la concentración de MO alta, lo que permite que exista alta capacidad de adsorción de metales; esto coincide con lo reportado por Petrovic *et al.* (1999), quienes mencionan que la concentración de ácidos húmicos y fúlvicos controlan la movilidad de los metales y, por lo tanto, los suelos con alto contenido de MO tienen una mayor capacidad de adsorción de metales.

La correlación encontrada entre Zn y Cd en la pella es no significativa, lo cual puede deberse a una posible competencia entre el Zn y Cd, en el momento de estar disponibles para la planta, debido a su semejanza estructural. Jonathan *et al.* (2002) han demostrado con estudios de campo con ¹⁰⁹Cd y ⁶⁵Zn, que la adición de

Zn puede reducir la acumulación de Cd en las plantas cultivadas, y demostraron que en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* y *T. turgidum*) la extracción de Cd²⁺ fue inhibida por Zn²⁺.

En la Figura 2 se muestra el grado de asociación entre la concentración de Pb y la de MO, donde existe una tendencia de aumento en la concentración de Pb en el suelo, conforme aumenta la concentración de MO en los mismos. Los valores más altos corresponden a los sitios ubicados e irrigados con agua del canal de chinampas (TCC) y, en segundo lugar, los sitios ubicados en el ejido e irrigados con agua tratada denominado sitio uno (TS1). Lo anterior se debe a que el EDTA empleado en la extracción de Pb recupera el Pb que se encuentra formando complejos de ese metal con la MO y con los carbonatos, siendo más significativo para la MO. Por las concentraciones evaluadas, se puede considerar que un sitio de reserva de Pb probablemente se localiza en la MO de los suelos estudiados.

Riesgo en el Consumo del Producto

Zinc. De los cuatro metales pesados evaluados, el Zn es un elemento esencial para las plantas. Las concentraciones en cada tejido dependen del cultivo y del manejo del mismo. Para brócoli se reportan concentraciones entre 25 y 60 mg kg⁻¹, cuando se analizan hojas completas, considerando la hoja madura más reciente (Castellanos, 1998; Benton, 2006) y concentraciones que varían de 0.5 a 1.2 mg kg⁻¹ en extracto celular de pecíolo (Castellanos, 1998); ambos análisis en precosecha.

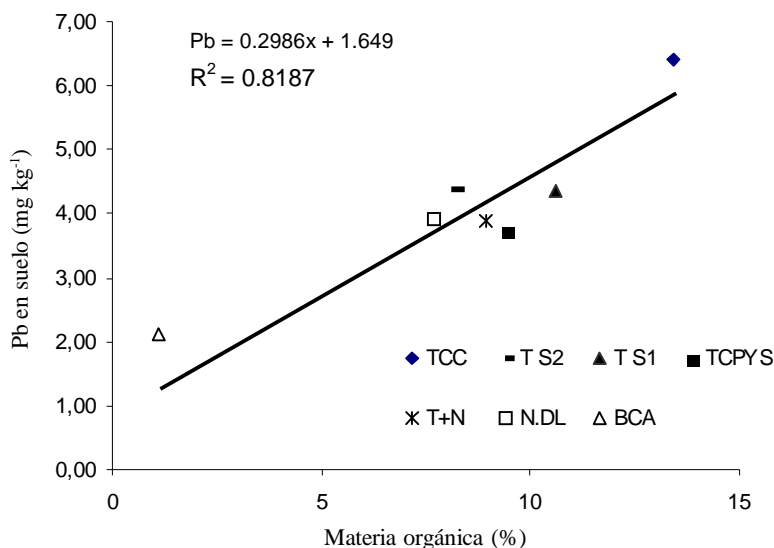


Figura 2. Disponibilidad de plomo (Pb) respecto a la concentración de materia orgánica en el suelo. TCC = suelo irrigado con agua del canal de las chinampas; TS2 = suelo irrigado con agua tratada del sitio de salida 2; TS1 = suelo irrigado con agua tratada del sitio de salida 1; T+N = suelos irrigados con agua tratada y negra; TCPYS = suelos irrigados con agua del canal principal y secundario; N.DL = suelos irrigados con agua negra del drenaje local; BCA = suelo irrigado con agua de pozo.

Desde el punto de vista de aporte de nutrientes en la alimentación humana, Haytowitz y Matthews (1986) reportan concentraciones de Zn de 330 mg kg⁻¹ en pella. Las concentraciones de Zn en la pella de brócoli, evaluadas en los tratamientos varían de 24.3 a 47.2 mg kg⁻¹ y, considerando la información anterior referente a las concentraciones de Zn en la planta y en la pella, las concentraciones encontradas se encuentran entre los intervalos que se establecen y pueden considerarse sin riesgo para la salud humana.

Cadmio, níquel y plomo. Con la finalidad de hacer una estimación del riesgo en la salud humana en relación con la acumulación de Cd, Ni y Pb, y el riesgo en la salud humana, se estimó el consumo per cápita de brócoli en México con base en datos de SIACON-SAGARPA (2004) e INEGI (2005) que corresponden a producción y población, respectivamente. El consumo per cápita estimado, sin considerar las exportaciones, fue de 2.8 kg año⁻¹ (Cuadro 6).

Con las concentraciones encontradas en pella de brócoli en los sitios evaluados y el consumo per cápita estimado de brócoli, el consumo potencial anual de Pb, Cd y Ni varían de 2.24 a 12.5, de 2.1 a 2.8 y de 1.4 a 12.62 mg por habitante por año, respectivamente, en personas que consuman brócoli con estas características y en estas cantidades.

Considerando los límites de la ingesta de metales pesados de la población establecidos por la FAO/OMS (2003) para Pb y Cd de 243 y 98 µg d⁻¹ que equivale a 88.7 y 35.7 mg por habitante por año para Pb y Cd, respectivamente. Las concentraciones encontradas en el área de evaluación son inferiores.

Con base en el límite fijado por la FAO/OMS (2003), se puede apreciar que un consumo de 2.8 kg por individuo por año de brócoli proveniente de los sitios evaluados, con la concentración más alta de Pb, equivale al 14% del total aceptable. Con el mismo consumo, la ingesta de Cd equivale a 7.8% del límite establecido.

Cuadro 6. Superficie sembrada y cosechada, producción total y rendimiento de brócoli en el Distrito Federal y nacional.

	Distrito Federal	Nacional
Superficie cosechada 2004 [†] (ha)	952	22 675.25
Producción total 2004 [†] (Mg)	12 798	289 343.09
Rendimiento promedio 2004 [†] (Mg ha ⁻¹)	13.44	12.76
Población (2005) [‡] (habitantes)	8 720 915	103 263.40
Consumo [§] (kg habitante ⁻¹ año ⁻¹)	ND	2.80

Fuente: [†] Bases de datos SIACON-SAGARPA (2004), (sin considerar exportación); [‡] INEGI (2005); [§] estimación del autor considerando los datos de SIACON-INEGI; ND = no disponible.

CONCLUSIONES

- Los índices de transferencia encontrados reflejan que las concentraciones en la planta son superiores a los encontrados en el suelo, sobre todo para cadmio, níquel y zinc.
- Las características químicas de los suelos y la concentración de metales pesados en el suelo y en la pella de brócoli presentaron correlaciones altas.
- Los valores de zinc en la pella están dentro del intervalo que se establece para este cultivo como elemento esencial.
- La ingesta de plomo y de cadmio se encuentran en niveles inferiores a los establecidos por la FAO/OMS, considerando un consumo per cápita de brócoli de 2.8 kg por habitante por año.

LITERATURA CITADA

- Baird, C. 1999. Environmental chemistry. 2nd ed. Freeman. New York, NY, USA.
- Benton, S. J. 2006. Zinc. pp. 411-430. *In*: A. V. Barker and D. J. Pflbeam (eds.). Handbook of plant nutrition. Taylor & Francis Group. New York, NY, USA.
- Birley, M. H. and K. Lock. 1998. Health and peri-urban natural resource production. *Environ. Urbanization* 10: 89-106.
- Bradford, G. R., A. L. Page, J. L. Lund, and W. Olmstead. 1975. Trace element concentrations of sewage treatment plant effluents and sludges: their interaction with soils and uptake by plants. *J. Environ. Qual.* 4: 123-127.
- Castellanos R., J. Z. 1998. El seguimiento de la nutrición del brócoli en los sistemas de fertirrigación. *Plantaciones modernas. Agrosem* 3: 137-152.
- Colombo, L. D., S. B. Mangione, and A. Figlioglia. 1998. Soil profile distribution of heavy metals in soil attended with sewage sludge for eight years. *Agric. Med. Inter. J. Agric. Sci.* 128: 273-283.
- Cottenie, A. 1980. Los análisis de suelos y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. *Boletín de suelos de la FAO* 38/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma, Italia.
- CSTPA (Council on Soil Testing and Plant Analysis). 1980. Handbook on reference methods for soil testing. Revised edition. University of Georgia. Athens, GA, USA.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica). 2000. Informe anual del contenido de sólidos, metales alcalinos y alcalinotérreos, y metales pesados del agua de tratamiento del Cerro de la Estrella. Subdesarrollo Tecnológico, Departamento del Distrito Federal. México, D. F.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica). 2001. Informe mensual de gasto de operación de las plantas de tratamiento del agua residual. Mím. Unidad Departamental de Tratamiento y Reuso. Departamento del Distrito Federal. México, D. F.
- FAO/OMS (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación/Organización Mundial de la Salud). 2003. Programa conjunto sobre normas alimentarias. Comisión del Codex Alimentarius. Roma, Italia. www.codezalimentarius.net
- Garza A., V. 2000. Reuso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez (Chihuahua, México) en el Valle de Juárez y su impacto en la salud pública. *Salud Pública y Nutrición* 1: 1-10.
- Haytowitz, D. B. and R. H. Matthews. 1986. Composition of foods. *Agriculture Handbook* 8. United States Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Hooda, P. S. and B. J. Alloway. 1994. The plant availability and DTPA extractability of trace metals in sludge-amended soils. *Sci. Total Environ.* 149: 39-51.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1980. Carta Edafológica E14B41, escala 1:50 000. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1993. Estadísticas del sector alimentario en México edición 1993. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1999. Ortofotos E14B41a Y E14B31d, con base en Fotografías aéreas escala 1:75 000. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2005. II Censo de población y vivienda. Sistemas nacionales, estadísticos y de información geográfica. Aguascalientes, México. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/acerca/inegi324.asp?c=324#tres> (Consulta: julio 19, 2006).
- Iretskaya, S. N. y S. H. Chien. 1999. Comparison of cadmium uptake by five different food grain crops grown on three soils of varying pH. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30: 441-448.
- Jiménez, J. J. y P. Nuñez. 1993. La producción en chinampas diversificadas de San Andrés Mixquic, México, D. F. pp. 62-74. *In*: R. Ferrera-Cerrato. Agroecología, sustentabilidad y educación. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Jonathan, J. H., M. W. Ross, A. N. Wendel, and V. K. Leon. 2002. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. *Physiol. Plant.* 116: 73-78.
- Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 1984. Trace elements in soil and plants. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- MAFF (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food). 1986. The analysis of agricultural materials. 3rd ed. Her Majesty's Stationery Office. London, UK.
- McBride, M. B. 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? *J. Environ. Qual.* 24: 5-18.
- Méndez G., T., L. Rodríguez D. y S. Palacios M. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra* 18: 277-288.
- Páez O., F., M. G. Frias-Espéricueta, and J. I. Osuna-López. 1995. Trace metals in relations to seasonal and gonadal maturation in the Oyster *Crassostrea iridescens*. *Mar. Environ. Res.* 40: 19-31.
- Pérez O., Ma. A., J. D. Etchevers, H. Navarro y R. Nuñez. 2000. Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en tepates. *Agrociencia* 34: 115-125.
- Petrovic, M., M. Kastelan-Macan, and A. J. Horvat. 1999. Interactive sorption of metals, ions and humic acids onto mineral particles. *Water Air Soil Pollut.* 111: 43-56.
- Puschenreiter, M., H. Wilfried, and H. Othmar. 1999. Urban agriculture on heavy metal contaminated soils in Eastern Europe. Ludwig Boltzmann Institute for Organic Agriculture and Applied Ecology. Viena, Austria.

- Quintos, R. J. y A. Quispe L. 2004. Estrategias de supervivencia de los productores agropecuarios en las áreas periurbanas de la ciudad de México. El caso de San Andrés Mixquic y San Nicolás Tetelco. *Comun. Socioeconomía, Estadística e Informática* 8: 1-26.
- Ramos B., R., L. Cajuste, D. Flores y N. García. 2001. Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. *Agrociencia* 35: 385-395.
- Rostagno, C. M. and R. Sosebee. 2001. Biosolids application in the Chihuahuan desert: effects on runoff water quality. *J. Environ. Qual.* 30: 160-170.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 2001. NORMA OFICIAL MEXICANA (NOM) NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Publicado en el diario oficial de la federación el 31 de diciembre de 2001. México, D. F.
- SIACON-SAGARPA (Sistema de Información Agropecuaria de Consulta-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). Delegación Estatal Nayarita. 2004. Estadísticas agrícolas nacionales. http://www.nay.sagarpa.gob.mx/seder/entidades_archivos/siacon/siaconagri.php (Consulta: junio 5, 2006).
- Spiro, G. T. and W. M. Stigliani. 2003. *Chemistry of the environment*. 2nd ed. Pearson-Prentice Hall. Iowa, USA.
- Valdés, P. y M. Cabrera. 1999. La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México. Texas Center for Policy Studies. Ciudadanía Lagunera por los Derechos Humanos y En Defensa del Ambiente (CILADHAC). Torreón, Coah., México.
- Vázquez A., A., L. J. Cajuste, R. Carrillo G., B. González Z., E. Álvarez S. y J. Z. Castellanos R. 2005. Límites permisibles de acumulación de cadmio, níquel y plomo en suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra Latinoamericana* 23: 447-455.
- Walter, I., F. Martínez y G. Cuevas. 2003. Dinámica de los metales pesados en un suelo degradado enmendado con residuos orgánicos urbanos. *Revista: Estudios de la Zona No Saturada del Suelo VI*: 367-372.
- Westerman, R. L. 1990. *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.