

ACUMULACIÓN Y DISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN SUELOS REGADOS CON AGUAS RESIDUALES EN EL DISTRITO DE RIEGO 03, TULA, HIDALGO, MÉXICO

Christina SIEBE

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-296, Coyoacán 04510 D.F., México

(Recibido diciembre 1993, aceptado junio 1994)

Palabras clave: riego agrícola, agua residual, metales pesados, suelos, agua, cultivos.

RESUMEN

En el Distrito de Riego 03, Tula, México, las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México se usan para riego agrícola desde hace 80 años. En este trabajo se estudiaron las tendencias de acumulación de metales pesados en pedosecuencias representativas que llevan diferente tiempo bajo riego. También se investigó la disponibilidad de esos metales pesados para los principales cultivos (alfalfa y maíz) comparando parcelas que han sido regadas durante 80 años con agua residual con aquellas en que ha sido empleada agua de pozo o que son de temporal. Se encontró que los metales introducidos a través del riego tienden a acumularse en la capa arable de los suelos mostrando después de 80 años concentraciones 3 a 6 veces mayores que en sitios con cultivo de temporal, aunque sin llegar aún a niveles críticos. La disponibilidad de Cd, Pb y Zn es moderada, no obstante su inclinación a incrementarse conforme aumentan los años de riego, siendo el Cd el más disponible. Por otra parte el Cu tiende a ser retomado por las plantas en menor cantidad, lo cual se atribuye a su inmovilización por la materia orgánica adicionada a los suelos por medio del agua residual.

ABSTRACT

In the Irrigation District 03, Tula, México, raw sewage water from Mexico City has been used for irrigation of agricultural land for 80 years. The accumulation of heavy metals was studied at representative pedosequences in lands which have been irrigated for several years. The availability of heavy metals to the main agricultural products (alfalfa and maize) was also investigated comparing crops yielded on fields irrigated with sewage for 80 years and fields irrigated with well-water or sites under rainfed agriculture. The results show that the heavy metals incorporated to the soils accumulate in the Ap-horizons. After 80 years the concentrations are 3 to 6 fold higher than those measured in soils from fields under rainfed agriculture, but still do not reach critical levels. The plant uptake of Cd, Pb and Zn is moderate to high in fields irrigated for a long time with sewage and with the highest values for the uptake of Cd. The Cu uptake, however, was lower at these sites due to immobilization by organic matter, which is added to the soils through sewage irrigation.

INTRODUCCIÓN

En los Distritos de Riego 03 (DDR 03) y 100 (DDR 100), ubicados a 80 km al Norte de la Ciudad de México (Fig. 1), las aguas residuales provenientes de la misma se usan para riego agrícola desde 1912 (Cruz Campa 1965). Con el crecimiento de la metrópoli y del volumen de las aguas de desecho, el área regada fue ampliándose hasta cubrir

actualmente alrededor de 85 000 ha. Las aguas residuales se aplican en una parte de los terrenos sin tratamiento alguno, por lo que resulta necesario conocer la dimensión en la que puedan ser incluidas sustancias nocivas a los suelos, que afecten su potencial productivo y/o sean absorbidas por los cultivos, incorporándose de esta manera a la cadena trófica. Entre los contaminantes introducidos a los suelos a través del riego con agua residual cruda, los

metales pesados ocupan un papel importante, ya que tienden a acumularse en los suelos a largo plazo y su remoción de los mismos es prácticamente imposible.

Hernández Silva *et al.* (1990) estudiaron las tendencias de acumulación de metales pesados en los suelos del DDR 03 comparando sus resultados con aquellos obtenidos en publicaciones anteriores (Mascareño Castro 1974, Gutiérrez Ruíz 1982, Méndez 1982) y encontraron comportamientos heterogéneos. Mientras el Mn, Cr, Pb, Co y Cd manifestaron tendencias al aumento, el Cu y el Zn lo hicieron a la disminución y el Fe y Ni exhibieron una aparente estabilidad. La comparación de datos elaborados por diversos autores es problemática, ya que los métodos analíticos, sobre todo en lo que respecta a la extracción de los metales del suelo, no son los mismos en cada una de las investigaciones examinadas.

En el presente trabajo se optó por establecer las tendencias de acumulación de metales pesados en sitios que llevan diferente tiempo bajo riego. De esta manera se logra abarcar un mayor lapso, además de lograr un marco de referencia con respecto a los contenidos naturales de metales pesados en la zona. Paralelamente se analizaron los dos principales cultivos de la zona (alfalfa y maíz) en función de sus contenidos de Cd, Pb, Cu, Zn y Cr, determinando su disponibilidad para las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se compararon pedosecuencias (Leptosoles Réndzicos y Mólicos, Feozems Háplicos y Calcáricos en terrazas y Vertisoles Éutricos) en sitios que llevan diferente tiempo de riego con agua residual (16, 20, 40, 65 y 80 años) con pedosecuencias bajo cultivo de temporal y otros que han sido regados con agua de pozo (zona testigo). En la figura 1 se presenta un esquema indicando los sitios de mues-

treo. Además se analizó el agua de riego mensualmente durante 6 meses en los canales de aguas residuales inmediatos a las parcelas seleccionadas (Canal Atotonilco y Canal Tlamaco-Juandhó) y en los dos pozos de los que se extrae el agua para riego en la zona testigo (Cañada Chica y El Arenal). Adicionalmente se tomaron muestras en el Canal Requena (a la altura de la planta termoeléctrica de Juandhó), que conduce aguas residuales mezcladas con agua de almacenamiento pluvial y fluvial de la presa Requena y que es utilizada en la mayor parte de las tierras agrícolas dentro del Distrito de Riego 03, al igual que del canal El Salto-Tlamaco (a la altura de el poblado El Dendho), que conduce agua proveniente del Emisor Profundo. De esta manera se pretende obtener una caracterización más amplia del agua empleada para riego en la zona con relación a su contenido de metales pesados.

En este trabajo se consideró al Cd, Pb y Cr por su importancia toxicológica y al Cu y Zn por su función como micronutrientes para las plantas, teniendo en cuenta además las diferencias que presentan estos metales en cuanto a su comportamiento en los suelos y a su disponibilidad para los cultivos ($Cd \geq Zn > Cu > Pb > Cr$, Scheffer y Schachtschabel 1984). La extracción de metales en muestras de suelo tamizadas < 2mm y molidas se realizó con agua regia (HCl/HNO_3 3:1), la de agua (conc. 45:1) con $HClO_4/HNO_3$ (APHA-AWWA-WPCF 1980), con la pretensión de lograr una extracción casi total de los metales, exceptuando aquéllos que forman parte de la estructura primaria de los silicatos, evitándose así el uso de ácido fluorhídrico y los problemas que éste involucra. La determinación de los metales se realizó con espectrofotometría de absorción atómica (AAS) de flama.

Para cada tipo de suelo se calcularon las cantidades de metales pesados en g/m^2 y el respectivo espesor del horizonte Ap para Leptosoles, 50 cm de profundidad para Feozems y 100 cm para Vertisoles, estimando la densidad

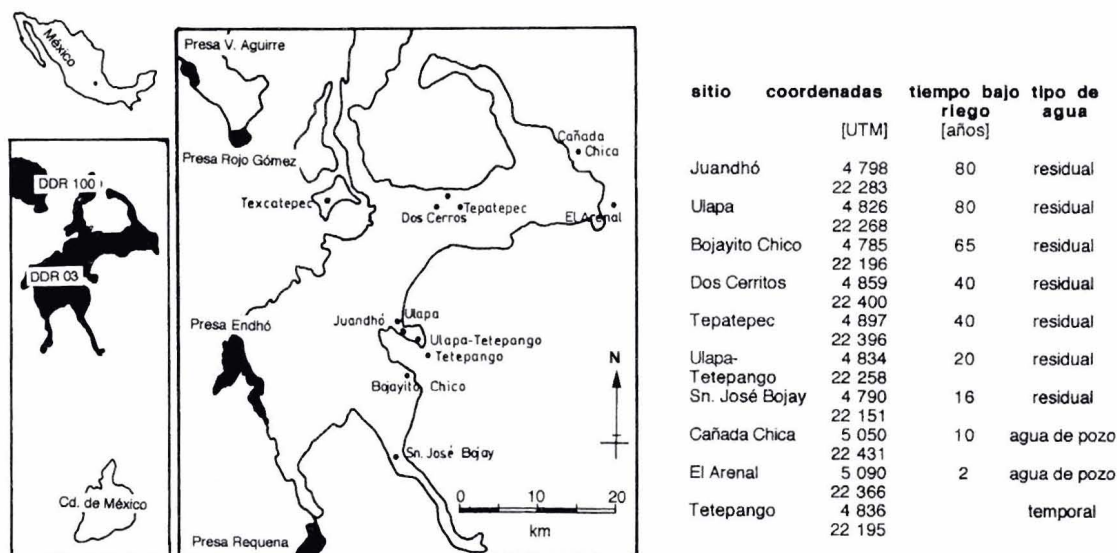


Fig. 1. Localización de la zona de estudio y de los sitios de muestreo

aparente (analizada en núcleos inalterados tomados con cilindros de 100 ml) y el porcentaje de piedras en volumen del suelo (establecido en la pared principal del perfil por medio de láminas comparativas de cubrimiento de área).

Además se obtuvieron muestras compuestas de alfalfa y de grano de maíz en sitios que llevan 80 años bajo riego con agua residual y en otros de riego con agua de pozo (alfalfas) o de cultivo de temporal (maíz). Las alfalfas fueron lavadas inmediatamente después de la colecta en baño acidulado, enjuagadas 4 veces con agua desionizada y secadas a 65°C. Una vez molidas, las alfalfas fueron digeridas con una combustión vía seca a 420°C, retomándose el residuo en HCl, mientras que los granos de maíz se digirieron vía húmeda con HNO₃ concentrado en bloque de aluminio. Las determinaciones de Cd, Pb, Cr, Cu se realizaron en AAS con horno de grafito, las de Zn con AAS de flama. La precisión de las digestiones se verificó con análisis repetidos de una muestra patrón (V-10) de la IAEA (International Atomic Energy Agency).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla I indica las concentraciones promedio y las desviaciones estándar de metales pesados en el agua de riego. Sólo el límite de tolerancia establecido para Cu (NOM 1993) fue sobrepasado ligeramente (0.21 mg/L) en el promedio de los 6 muestreos en uno de los canales (El Salto-Tlamaco).

Las cantidades de metales pesados presentes en los suelos se graficaron en función del tiempo bajo riego (Fig. 2). Se observan tendencias al aumento para todos los metales conforme se incrementa el tiempo. Después de 80 años de irrigación con agua residual las cantidades de metales son 3 a 6 veces mayores que en suelos regados con agua de pozo o cultivo de temporal.

Los coeficientes de determinación para las regresiones calculadas se localizan en el orden de 0.87-0.92 para Leptosoles, 0.84-0.97 para Feozems y 0.40-0.68 para Vertisoles. Los niveles de significancia fueron <0.01 para Leptosoles y <0.05 para Feozems, mientras que para Vertisoles no fueron significativos. La variabilidad evidenciada puede explicarse por las diferencias tanto en la lámina de riego (680 a 3300 mm al año según el cultivo y el tipo de suelo, siendo mayor en Vertisoles y menor en Leptosoles), como en la concentración de metales en el agua. Los bajos coeficientes de determinación obtenidos para Vertisoles son ocasionados por los contenidos relativamente bajos de metales encontrados en el perfil ubicado en Bojayito Chico (65 años bajo riego). Por falta de la presencia de Vertisoles en el área que lleva 40 años bajo riego, la regresión se tuvo que calcular con un punto menos, lo que le dio mayor influencia al perfil de Bojayito Chico. Sería necesario analizar otro perfil dentro de esta zona, para establecer con más precisión los coeficientes que determinan la regresión.

Los metales adicionados al suelo a través del riego con agua residual se acumularon en el horizonte Ap de todos los

TABLA I. CONCENTRACION DE METALES PESADOS* EN LAS AGUAS DE RIEGO

	Pb	Cd	Cu [mg/L]	Zn	Cr
<i>Canal</i>					
Requena	0.08 (±0.026)	ND	0.13 (±0.085)	0.31 (±0.14)	0.11 (±0.069)
Tlamaco-Juandhó	0.10 (±0.021)	0.005 (±0.001)	0.12 (±0.031)	0.37 (±0.160)	0.09 (±0.049)
Atotonilco	0.08 (±0.043)	0.005	0.10 (±0.054)	0.26 (±0.17)	0.08 (±0.054)
El Salto-Tlamaco	0.15 (±0.10)	0.006 (±0.002)	0.21 (±0.166)	0.60 (±0.37)	0.13 (±0.09)
<i>Pozo</i>					
El Arenal	ND	ND	≤0.01	≤0.01	≤0.01
Cañada Chica	0.02	ND	ND	≤0.01	0.02
Límite de tolerancia NOM (1993)	5	0.01	0.2	2	1
* Promedios de 6 muestreos con sus respectivas desviaciones estándar ND, no detectable					

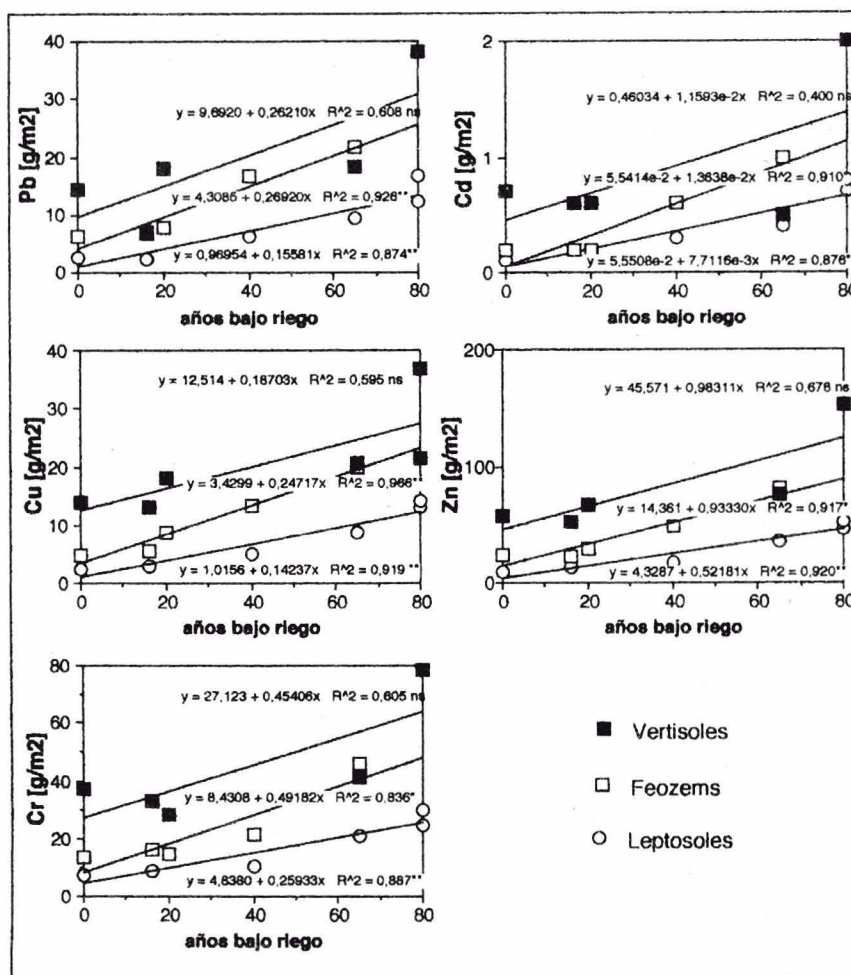


Fig. 2. Gráficas de los contenidos de Zn, Cd, Pb, Cr y Cu en g/m² de suelo, calculados en Leptosoles para todo el espesor del horizonte Ap, para Feozems hasta 50 cm y para Vertisoles hasta 100 cm de profundidad en función del tiempo bajo riego

suelos (0-30 cm) y en el Feozem también en el horizonte Ah1 (Tabla II). Esto último puede deberse a que el terraceo se haya realizado en años recientes para lograr una menor pendiente del terreno, quedando el antiguo Ap sepultado por el material removido de las partes superiores de la parcela. De acuerdo con los criterios establecidos en el "Leitraad Bodensanering" de Holanda (LfU 1989), las concentraciones encontradas para Pb están dentro de los rangos considerados como normales, mientras las de Cd, Cr, Cu y Zn están ligeramente por encima, aunque no rebasan al valor recomendado para realizar estudios más detallados.

En las muestras de alfalfa se determinó mayor contenido de Cd, Pb, Cr y Zn, pero menor de Cu en el promedio de las muestras tomadas en sitios regados con agua residual, en comparación con aquellas colectadas bajo riego con agua de pozo (Fig. 3). Pb, Cr y Cd están dentro del rango considerado como normal en un estudio estadístico realizado por Dokumentationsstelle (1976) en sitios no contaminados. El Zn en alfalfas regadas con aguas residuales se encuentra dentro del nivel nutricional

"suficiente" (Bergmann y Neubert 1976), en cambio el Cu se halla en niveles "bajos", mientras que en sitios no contaminados está en cantidades "suficientes". Las plantas absorben al Cu preferentemente como Cu^{2+} de la solución del suelo (Kabata-Pendias y Pendias 1984, Marschner 1986). Sin embargo, también existen evidencias que algunas especies absorben Cu en forma de complejos orgánicos de bajo peso molecular, aunque esto lo hacen en menor medida, que cuando tienen a su disposición al Cu iónico, además de que la absorción dependerá del tamaño, de la solubilidad y de la estabilidad del complejo orgánico (p.e. Marschner 1986). Tanto los contenidos de materia orgánica total como de carbón orgánico soluble en los suelos del Distrito de Riego 03 muestran una clara tendencia al aumento conforme se incrementa el tiempo bajo riego (Siebe 1994). Por lo tanto, la disminución en la absorción de Cu por alfalfa en los sitios aquí estudiados probablemente esté relacionada con la formación de complejos orgánicos de Cu de baja disponibilidad para la planta.

TABLA II. CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN LA CATENA DE BOJAYITO CHICO, REGADA CON AGUA RESIDUAL, DISTRITO DE RIEGO 03, TULA, MEXICO

Suelo	Horizonte	Profundidad	Pb	Cd	Zn	Cu	Cr
		(cm)			(mg/kg)		
Leptosol	Ap	0-30	24	0.57	77	20	52
	mC(k)w	>30	10	0.14	56	12	29
Feozem	Ap	0-26	50	1.55	161	41	100
	Ah1	26-44	50	1.63	165	40	111
	Ah2	44-70	19	0.72	70	20	45
	mCwk	>70	9	0.23	56	14	23
Vertisol	Ap1	0-15	40	0.78	119	33	65
	Ap2	15-32	34	0.71	113	33	62
	Ah1	32-50	12	0.21	51	15	33
	Ah2	50-80	9	0.18	56	15	29
	Ah3	80-98	9	0.13	59	14	29
	AC	>104	6	0.12	58	14	28

En comparación con los estudios antes referidos realizados en la misma zona, los intervalos en las concentraciones de metales pesados encontrados en este trabajo son ligeramente menores en lo que respecta a Cd, Zn y Cu, iguales en lo referente a Cr e inferiores a Pb (en los trabajos previos se describen concentraciones entre 6 y 11 mg/kg de Pb en promedio). Esta discrepancia puede deberse a que en la presente investigación las muestras fueron lavadas con baño acidulado y colectadas en sitios lejanos a carreteras.

En un análisis de regresión múltiple, en el que se consideró el tipo de riego y el de suelo, se notó una influencia altamente significativa ($p < 0.01$) del primero sobre los contenidos de Cd, Pb y Zn y no significativa para Cu y Cr. La influencia del tipo de suelo tampoco lo fue.

Las muestras de grano de maíz colectadas en los sitios regados con agua residual manifestaron concentraciones en promedio de 0.033 mg/kg de masa seca de Pb (+/-0.007), 0.033 mg/kg de Cd (+/-0.01), 1.44 mg/kg de Cu (+/-0.19) y 32.5 mg/kg de Zn (+/-3.1), todas consideradas como normales (Dokumentationsstelle 1976, Kabata

Pendias y Pendias 1984) (Fig. 4). En los sitios de temporal las concentraciones de Pb estuvieron bajo el límite de detección (0.02 mg/kg masa seca), las de Cd fueron de 0.008 mg/kg (+/-0.002), las de Cu de 1.54 mg/kg (+/-0.25) y las de Zn de 26.3 mg/kg (+/-3.2) (Fig. 4). Las diferencias fueron significativas ($p < 0.05$) para Cd tanto en Leptosoles como en Vertisoles.

De estos resultados puede concluirse que los metales pesados Cd, Pb, Cr y Zn introducidos en los suelos a través del riego con agua residual tienden a acumularse en la capa arable de los suelos, pero después de 80 años solo se encuentran disponibles para las plantas en cantidades moderadas, siendo el Cd el más disponible. El Cu en cambio parece encontrarse menos disponible para la alfalfa en los sitios regados con aguas residuales, ya que es inmovilizado por la materia orgánica. La moderada absorción de los metales por las plantas concuerda con la alta capacidad filtro y amortiguadora de los suelos de la zona, los cuales muestran pH neutros a alcalinos, contenidos medios a elevados de materia orgánica, texturas

limosas y capacidades de intercambio catiónico de medias a altas (Flores Delgadillo *et al.* 1992, Siebe 1994).

La introducción de los metales pesados aquí estudiados a los suelos a través del riego con aguas residuales no ha representado un riesgo para el potencial productivo de los suelos, ni tampoco ha aumentado a niveles preocupantes la incorporación de metales a la cadena trófica. Sin embargo, los resultados de esta investigación ponen en evidencia, que el riego con agua residual no puede practicarse durante períodos de tiempo ilimitados, ya que los metales tienden a acumularse en la capa arable de los suelos y la absorción por los cultivos, principalmente de Cd, también aumenta. De lo anterior se deriva la necesidad de coordinar los límites de tolerancia establecidos para las aguas de riego con períodos de tiempo. Además deben tomarse en cuenta las diferencias existentes en la capacidad filtro y amortiguadora de los tipos de suelo agrícolas, ya que éstas se agotarán con mayor rapidez en suelos de textura más gruesa y de reacción ligeramente ácida que en los limosos y de reacción neutra a alcalina del Distrito de Riego 03.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera podido realizarse sin la ayuda y el apoyo brindado por las autoridades del Distrito de Riego 03, en especial el Ing. Antonio Velasco (Jefe del Distrito de Riego 03) y el Ing. Leobardo Hernández Hernández (Oficina de Riego y Drenaje), al igual que de la brigada de muestreo compuesta por Margarito y Paulino Mendoza Barrera, Aureliano Márquez Encarnación y Francisco Aguilar Barrera. Daniel Hernández Santiago del Instituto de Geología contribuyó en el análisis estadístico de los datos. El apoyo financiero fue otorgado por la Vater und Sohn Eiselen- Stiftung (Ulm, Alemania) y la Gottlieb Daimler- und Carl Benz- Stiftung (Ladenburg, Alemania).

REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WPCF (1989). Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 15^a Ed., Washington, D.C.
- Bergmann W. y Neubert P. (1976). Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. VEB Gustav Fischer, Jena, pp.559-564.
- Cruz Campa S. de la (1965). Rehabilitación integral del Distrito de Riego 03, Tula, Hgo. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 163 p.
- Dokumentationsstelle (1976). Spurenelemente mit toxischer Wirkung, -Tabellen über Gehalte in Futtermitteln- Daten und Dokumente zum Umweltschutz Nr. 11. Edit. Dokumentationsstelle der Universität Hohenheim, Stuttgart, 114 p.
- Flores Delgadillo L., Hernández Silva G., Alcalá Martínez R. y Maples Vermeersch M. (1992). Total contents of Cd, Cu, Mn, and Zn in agricultural soils irrigated with wastewater from Hidalgo, Mexico. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 8, 37-46.
- Gutiérrez Ruiz M.E. (1982). Estudio del contenido de iones inorgánicos en suelos y plantas de los Distritos de Riego 03 y 88. Tesis de Maestría. Facultad de Química, UNAM, México D.F., 251 p.
- Hernández Silva G., Maples Vermeersch M., Hernández Santiago D., Solorio Munguía G. y Villarreal. G. (1990). Tendencias en la acumulación de metales pesados en los suelos del Distrito de Desarrollo Rural 063, Edo. de Hidalgo, por efecto del riego con aguas negras. En: Memoria del 1^{er} Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Ed. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., pp. 46-47.
- Kabata Pendias A. y Pendias H. (1984). *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, 5^a Ed. (1989), Florida, 315 p.
- LfU (1989). Grenzwerte und Richtwerte für die Umweltmedien Luft, Wasser, Boden. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Ed.), 47 p.
- Marschner H. (1986). *Mineral nutrition of higher plants*. 4^a Ed. Academic Press, Londres, 674 p.
- Mascareño Castro F. (1974). Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y la producción agrícola en el Distrito de Riego 03, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- Méndez T. (1982). Estudio sobre contaminación de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo., por ABS, boro y metales pesados por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F., 134 p.
- NOM (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-032-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola. *Diario Oficial de la Federación*, 18.10.1993, México D.F., pp. 120-128.
- Scheffer F. y Schachtschabel P. (1984). *Lehrbuch der Bodenkunde*. 11^a Ed., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, pp. 271-276.
- Siebe Ch. (1994). Akkumulation, Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in langjährig mit städtischen Abwässern bewässerten Böden in Zentralmexiko. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*, 17. Institut für Bodenkunde und Standortslere der Universität Hohenheim, 213 p.