

## EFFECTOS DE LA ADICIÓN DE LODOS RESIDUALES SOBRE UN SUELO AGRÍCOLA Y UN CULTIVO DE MAÍZ

Ma. Laura ORTIZ-HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, Enrique SANCHEZ-SALINAS<sup>1</sup> y Margarita GUTIÉRREZ-RUIZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigaciones Ambientales, Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62210, Cuernavaca, Mor. Tel (73) 29 70 57. Fax (73) 29 70 30. Correo electrónico: ortizhl@cib.uaem.mx

<sup>2</sup>Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F.

*(Recibido noviembre 1997, aceptado enero 1999)*

Palabras clave: lodos residuales, suelos agrícolas, metales pesados

### RESUMEN

El trabajo experimental se realizó en el campo, en donde se aplicaron lodos residuales directamente sobre el suelo. Con ello se pretendió probar su capacidad de proveer nutrimentos para el crecimiento de las plantas y de introducir elementos potencialmente tóxicos a la cadena alimentaria. Los lodos y los suelos se analizaron químicamente antes de la adición. El suelo fue cultivado anualmente con maíz, durante dos años consecutivos, utilizando dosis de 1 y 5 ton/ha. La composición de los lodos fue de 50% de materia orgánica, 4.93% de N total, 1.28% de P y diferentes concentraciones de Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Zn, Cu, Mn, Fe, Ni, Cr y Pb. También se evaluó la concentración disponible de estos elementos y se encontraron proporciones entre 1 y 10% de solubilidad. La aplicación de lodos fue benéfica y proporcionó nutrimentos adicionales y materia orgánica. El pH bajó ligeramente al final del experimento. Con el objetivo de evaluar la absorción de metales pesados por las plantas cultivadas, se tomaron muestras de los tejidos vegetales. No se encontró acumulación de estos elementos y no se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad. Los nutrimentos se encontraron en concentraciones normales.

### ABSTRACT

The land experiment was carried out with direct application of sewage sludge on soils. Sewage sludges and soils were analyzed chemically for organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron, manganese, copper, zinc, cadmium, chromium, nickel and lead. Sewage sludges were evaluated for effectiveness in providing plant nutrients and the introduction of heavy metals into the food chain. The soil was used to grow corn annually for two years, using rates from 1 to 5 tonnes per hectare. The composition of sewage sludges used was: organic matter, 50%; total nitrogen, 4.93%; phosphorus, 1.28% and different concentrations of Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Zn, Cu, Mn, Fe, Ni, Cr y Pb. The available concentration was also evaluated and rates from 1 to 10 per cent of solubility were found. Sludge application was beneficial in providing additional nutrients and organic matter. The pH value was lower at the end of the experiment. Test crops of field corn were also sampled with the aim to evaluate the uptake of heavy metals by plants. No toxicity or undesirable high levels of heavy metals were found. The essential nutrients were in normal levels.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la disposición de desechos líquidos y sólidos, es uno de los mayores problemas en la República Mexicana. Particularmente el manejo, el tratamiento y la disposición de lodos residuales, no ha recibido la atención necesaria. Los lodos son los residuos sólidos del tratamiento de aguas de desecho, los cuales están compuestos por materia orgánica residual no convertida, microorganismos, elementos no biodegradables y sales inocuas y/o potencialmente tóxicas que se han removido durante el tratamiento. La composición específica de los lodos depende de las características particulares del tipo de agua residual y del tratamiento al que se somete (Ortiz *et al.* 1995).

En México se cuenta con 403 plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad total instalada de 30 m<sup>3</sup>/s, de los cuales se envían 18 m<sup>3</sup>/s a 226 plantas que tratan aguas residuales municipales y 12 m<sup>3</sup>/s a 177 que depuran aguas residuales industriales (Arroyo y Molina 1990). De acuerdo con Ortiz *et al.* (1995) en la República Mexicana se generan entre 28 a 84 millones de ton/año de lodos residuales.

La normatividad ambiental vigente considera a los lodos como residuos peligrosos (Diario Oficial de la Federación 1993), por lo que obliga a transportarlos, manejarlos y disponerlos adecuadamente. No obstante, en México, ninguna planta depuradora de efluentes cuenta con sistemas para el tratamiento, la estabilización y la disposición de los sólidos generados, por lo que se disponen principalmente a cielo abierto, se envían a basureros o se descargan en barrancas o en el alcantarillado.

En los países de la Unión Europea, en Estados Unidos y en Japón, las principales prácticas de disposición final son la incineración, el depósito en confinamientos controlados y la utilización como mejoradores de suelos (Fig. 1) (Smith 1996). La incineración de lodos es limitada por el incremento de los costos de combustible, por el peligro de emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera, por la emisión de compuestos orgánicos y por el riesgo que las cenizas representan en la contaminación de acuíferos (Shen 1979). El problema para implementar un si-

tio destinado a su confinamiento, radica en la selección y disponibilidad del lugar adecuado (no debe llover en grandes cantidades, subsuelo impermeable, cuenca cerrada, ubicación lejos de poblaciones, entre otros requisitos) (Hendrix y Buckley 1992).

Por lo tanto, la alternativa de utilizar los lodos residuales como mejoradores de suelos agrícolas es viable, siempre y cuando se lleve a cabo un seguimiento de elementos potencialmente tóxicos en suelos, plantas y agua (Page *et al.* 1987). La aplicación de lodo al suelo le aporta los nutrientes que contiene y que son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, además mejora las propiedades físicas y químicas del suelo por su contenido de materia orgánica. No obstante, existen factores que convierten a los lodos en un residuo potencialmente contaminante, debido a la presencia de metales, compuestos orgánicos, contenido de nitrógeno y fósforo que excedan las necesidades de los cultivos y microorganismos patógenos (Ortiz *et al.* 1995). Otros problemas asociados incluyen: aceptación pública (EPA 1977), olor, patógenos (Gerba 1983), contaminación de aguas superficiales y profundas, fitotoxicidad, introducción de elementos potencialmente tóxicos en la cadena alimentaria (Calcutt y Moss 1984) y en algunos casos, sobrefertilización.

Chang *et al.* (1992), describieron una metodología para evaluar los criterios de fitotoxicidad de los metales cuando se aplica lodo residual al suelo. Ésta se basa en el análisis de la relación entre la concentración de metales en los tejidos vegetales y el retardo en el crecimiento de plantas crecidas en condiciones de laboratorio con sales simples. Los datos de campo se utilizaron para estimar las proporciones de los metales del suelo correspondientes al umbral de toxicidad en los tejidos de las plantas. Arbitrariamente seleccionaron una reducción del 50% en el rendimiento, como límite para contar con un acercamiento del comportamiento del maíz (*Zea mays* L.), de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) y del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). La concentración umbral de zinc en hojas fue de 1975 mg/kg para maíz, de 475 mg/kg para lechuga y de 375 mg/kg para frijol.

En este trabajo, se llevó a cabo un experimento de campo cuyos principales objetivos fueron evaluar el efecto de los lodos residuales sobre las características químicas de un suelo agrícola y sobre el crecimiento de un cultivo de maíz. Asimismo se propuso determinar la concentración de metales y nutrientes en tejidos vegetales de las plantas cultivadas sobre un suelo con lodos residuales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la época de lluvias se llevó a cabo un experimento sobre un suelo de tipo Vertisol, que se eligió en función de la disponibilidad del terreno y su cercanía a la planta de tratamiento. Se seleccionó al maíz como el cultivo a implantarse sobre el suelo con lodo, ya que es el cultivo más común en la zona de estudio. Antes de la aplicación de lodo se tomaron

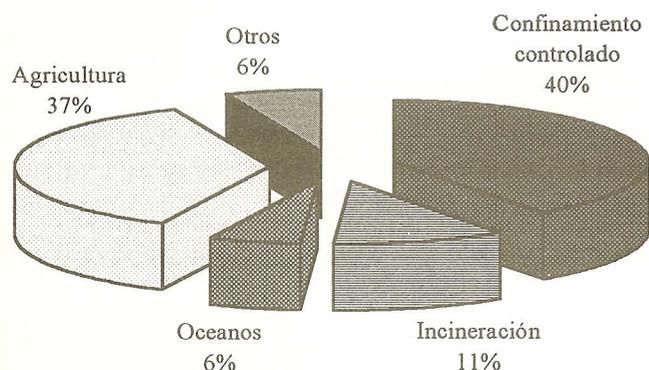


Fig. 1. Disposición final de lodos residuales en la Unión Europea (Smith 1996)

muestras del suelo y del lodo residual que sería adicionado, con la finalidad de comparar los cambios ocurridos por la acción de los tratamientos. Cabe mencionar que los lodos utilizados fueron caracterizados anteriormente por Ortiz *et al.* (1995), donde se llevaron a cabo muestreos mensuales durante un año.

#### Muestreo y pretratamiento de lodos residuales (EPA 1988)

Para caracterizar el lodo que se adicionó al suelo, se tomaron muestras de aproximadamente 1 kg de lodo residual de una planta de tratamiento biológico (lodos activados), que recibe mezclas de aguas residuales industriales y domésticas. Se colocó en un recipiente de polietileno previamente lavado con ácido nítrico diluido y enjuagado debidamente con agua destilada. Esta muestra se conservó en refrigeración y se trasladó al laboratorio, donde se secó a 100°C hasta peso constante. Posteriormente se molió en un mortero de ágata y se tamizó a través de una malla de 0.5 mm. El lodo seco se guardó en un frasco de vidrio con boca ancha y con tapa de plástico hasta su análisis.

#### Muestreo y pretratamiento de suelos

Se tomaron 5 muestras al azar (a una profundidad de 0-20 cm) de cada una de las parcelas experimentales y posteriormente se homogeneizaron para formar una muestra compuesta. Se secaron al aire, se tamizaron en una malla con 2 mm de abertura y se guardaron en el laboratorio de acuerdo con las especificaciones de Ortiz *et al.* (1993a y b).

#### Análisis de laboratorio

Las técnicas utilizadas para los análisis químicos de lodos y suelos, fueron las descritas por Ortiz *et al.* (1993a y b). Para la determinación de la concentración total de elementos potencialmente tóxicos, las muestras se solubilizaron mediante digestión con una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico ( $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ ). A las soluciones resultantes, se les cuantificaron los siguientes elementos: Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, Pb y Co por medio de espectrofotometría de absorción atómica. El aparato usado fue un GBC modelo 908, equipado con corrector de fondo (lámpara de deuterio). Las condiciones de operación del equipo se fijaron según las instrucciones de GBC (1995). El K y Na se determinaron en un espectrofotómetro de flama Corning 400.

Para cuantificar la disponibilidad de los metales (solubles e intercambiables), se llevó cabo una extracción con una solución de  $\text{NH}_4\text{EDTA}$  0.05 M (Bloomfield y McGareth 1982). Para ello se agitó una suspensión de 5 g de lodo con 25 mL de  $\text{NH}_4\text{EDTA}$  0.05 M, durante 30 minutos y se filtró para recuperar la solución. La cuantificación se llevó a cabo por medio de espectrofotometría de absorción atómica, siguiendo las especificaciones del aparato mencionadas anteriormente.

Se utilizaron reactivos marca J.T. Baker grado analítico y estándares marca Merck tritisol de 1000 mg/L. Los análisis se hicieron por duplicado y con un blanco, mientras que los datos se reportan en base seca.

#### Dosificación de lodos para su agregación al suelo

Para adicionar el lodo residual al suelo y no rebasar el contenido de elementos contaminantes por encima de los niveles aceptados internacionalmente, es recomendable controlar las adiciones considerando al elemento de mayor concentración en el lodo, su concentración máxima permitida en el suelo, la frecuencia anual de aplicación del lodo y el número de años que desea agregarse al suelo. Por tal motivo, se utilizó una ecuación a partir de la fórmula utilizada por la Comunidad Económica Europea (ahora Unión Europea) (Lester 1987a y b), la cual se modificó (ya que no contempla el contenido inicial del metal en el suelo) para quedar de la siguiente manera:

$$\text{Ton de lodo residual/ha} = (N-n) (P) / (F) (T) (A)$$

en donde:

N = concentración máxima permitida del elemento en suelos (ppm)

n = concentración del elemento en el suelo (ppm)

P = peso de una hectárea de suelo, considerando una densidad aparente de 1 g/mL y una profundidad de 20 cm (ton).

F = frecuencia anual de aplicación del lodo

T = concentración del elemento en el lodo (ppm)

A = número de años de aplicación del lodo

Para calcular la cantidad de lodos que pueden adicionarse al suelo, es importante considerar las concentraciones máximas permitidas de cada elemento en suelos Vertisoles, aceptadas internacionalmente, que de acuerdo con Aubert y Pinta (1977), son las siguientes:

$$\text{Zn} = 250 \text{ ppm}, \text{Cu} = 130 \text{ ppm}, \text{Ni} = 300 \text{ ppm}, \text{Cr} = 300 \text{ ppm}, \\ \text{Mn} = 1000 \text{ ppm} \text{ y } \text{Pb} = 70 \text{ ppm}$$

Considerando los análisis de suelos y a Sánchez y Ortiz (1989), las concentraciones de metales en suelos donde se realizó el experimento son las siguientes:

$$\text{Zn} = 79 \text{ ppm}, \text{Cu} = 53 \text{ ppm}, \text{Ni} = 80 \text{ ppm}, \text{Cr} = 65 \text{ ppm}, \text{Mn} = \\ 760 \text{ ppm} \text{ y } \text{Pb} = 20 \text{ ppm}.$$

Con base en la ecuación diseñada, se calculó el tonelaje que se puede añadir por hectárea durante 50 años, con una aplicación anual. La ecuación se debe aplicar para cada uno de los elementos potencialmente tóxicos presentes en los lodos residuales, con la finalidad de elegir la menor dosis que resulte. En el caso de los lodos utilizados en este experimento, la dosis que resultó ser la menor fue de 4.94 ton/ha, de acuerdo con la concentración del zinc.

#### Experimento agrícola

En el experimento agrícola se utilizó un diseño de bloques

al azar, para abatir los efectos de la variabilidad del suelo. Se formaron 9 unidades experimentales (parcelas), a las que se les adicionaron los siguientes tratamientos: 0, 1 y 5 ton/ha de lodo. La dosis menor se definió arbitrariamente y la mayor, en función de los cálculos efectuados anteriormente. A cada tratamiento le correspondieron tres repeticiones. Cada parcela ocupó un área aproximada de 383 m<sup>2</sup> (22 X 17.4 m), incluyendo dos surcos terminales sin tratamiento para eliminar el efecto de colindancia. El área total utilizada para el experimento fue de aproximadamente 3,450 m<sup>2</sup>.

Se procedió a aplicar el lodo residual al suelo utilizando un rastrillo y pala para homogeneizarlo, a una profundidad de 20 cm, considerada como la capa arable. El lodo se dejó en el suelo aproximadamente un mes, con el objeto de disminuir la población de microorganismos patógenos por el efecto de factores ambientales y para permitir una mayor homogeneización del lodo con el suelo. Posteriormente se construyeron los surcos con 75 cm de distancia entre ellos.

A continuación se sembraron las semillas de maíz de la variedad H-419, lo cual se realizó en forma manual y ubicando las semillas en el lomo del surco. Se colocaron las semillas a unos 7 cm de profundidad, con una distancia entre ellas de 30 cm y depositando tres semillas por punto. En el momento de la siembra, se aplicó un plaguicida organofosforado (terbufos o counter) para el combate de la «gallina ciega» (*Phillophaga spp*), que se detectó en el suelo antes del experimento. Se llevaron a cabo labores de deshierbe en forma manual, dos veces por ciclo. Se hicieron dos adiciones de lodo, una vez por año y antes de la siembra (cuidando que las dosis utilizadas fueran las mismas en las parcelas correspondientes). Durante los dos años se cultivó maíz.

#### Análisis de tejidos vegetales

Antes de la cosecha se colectaron hojas maduras y la raíz de plantas de maíz tomadas al azar, del centro de la parcela. Se lavaron con agua destilada y se secaron a 70<sup>o</sup> C para su posterior análisis químico. Además, en el momento de la cosecha, se colectaron las mazorcas de plantas tomadas del centro de cada una de las parcelas. El grano que se obtuvo, se pesó y se secó a 75<sup>o</sup> C para su posterior análisis.

Para los análisis de hojas, raíz y grano, se molieron y se tamizaron a través de una malla, con abertura de 0.5 mm. Se tomó 1 g de cada muestra y se llevó a cabo una digestión con HNO<sub>3</sub> y HClO<sub>4</sub>. La solución resultante se filtró y se aforó a 100 mL. De aquí se determinaron los siguientes elementos por medio de espectrofotometría de absorción atómica: Mg, K, Fe, Zn, Mn, Cu, Co, Cr, Pb Ni y Cd (GBC1995). El nitrógeno se determinó utilizando el método Kjeldahl y el fósforo por el método del fosfomolibdato.

#### Análisis de suelos después de la cosecha

Después de la cosecha del maíz se tomaron muestras compuestas (formadas por 5 submuestras de cada una de las 9 parcelas) de suelos superficiales (0-20 cm). Se secaron al aire (temperatura ambiente) y se tamizaron a través de una malla de

2 mm (No. 10). Estos suelos se analizaron para determinar los parámetros mencionados en la sección de análisis de laboratorio.

#### Determinación del rendimiento del maíz cultivado (kg/ha)

La totalidad del grano cosechado se pesó y se sumó con el resultado del grano colectado para análisis. Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el rendimiento en kg/ha.

#### Análisis estadístico

Para determinar si existieron diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de los tratamientos en el experimento agrícola, se utilizó un análisis de varianza, siguiendo un diseño de bloques al azar.

## RESULTADOS

#### Caracterización de lodos

Los resultados de los análisis de los lodos residuales utilizados en el primero y segundo ciclo se muestran en las **tablas I y II**. Presentan una conductividad eléctrica de 3.91 y 1.44 mS/

TABLE I. ANÁLISIS DEL LODO ADICIONADO AL SUELO EN LOS CICLOS 1 Y 2

Parámetro	Lodo adicionado	
	en el ciclo 1	en el ciclo 2
pH	6.40	5.68
CE (suspensión 1:5 lodo/agua) (mS/cm)	3.91	1.44
Materia orgánica (%)	51.64	50.98
N total (%)	5.03	4.93
N orgánico (%)	4.45	4.33
Relación C/N	5.95	6.00
CIC (meq/100 g)	64.00	61.00
Ca <sub>i</sub> (meq/100 g)	16.74	15.40
Mg <sub>i</sub> (meq/100 g)	5.79	4.81
Na <sub>i</sub> (meq/100 g)	6.81	5.50
K <sub>i</sub> (meq/100 g)	7.40	5.60
P disponible (%)	0.17	0.29
P total (%)	1.28	1.25

CE = conductividad eléctrica; SD = sin determinar

cm, respectivamente. Estos valores son altos e indican que el uso de estos lodos puede aumentar la salinidad en suelos con problemas de drenaje, ya que de acuerdo con el Laboratorio de Salinidad de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica (USSLS 1954), una conductividad mayor de 4 mS/cm, restringe el crecimiento de la mayoría de los cultivos.

Presentaron un pH ligeramente ácido (6.40 y 5.68, respectivamente), mientras que los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y nitrógeno orgánico en el lodo residual, son altos. Este último constituye el 88.47 % del nitrógeno total. Los

**TABLA II.** CONTENIDO DE METALES EN EL LODO ADICIONADO AL SUELO EN LOS CICLOS 1 Y 2

Metales (ppm)	Lodo adicionado en el ciclo 1		Lodo adicionado en el ciclo 2	
	Disponible	Total	Disponible	Total
Hierro	860.44	12,136.00	670.22	9,453.00
Manganeso	9.66	95.00	7.42	73.00
Zinc	46.26	1,385.00	40.91	1,225.00
Cobre	30.21	364.00	27.80	335.00
Plomo	16.90	540.00	14.77	472.00
Cromo	<<0.05	335.00	<<0.05	243.00
Níquel	13.10	96.76	13.09	96.65
Cobalto	<<0.05	<<0.05	<<0.05	<<0.05
Cadmio	<<0.02	<<0.02	<<0.02	<<0.02

valores son elevados comparados con el nitrógeno del suelo y corresponden a lo esperado por los valores de porcentaje de carbono orgánico (30.37% y 29.98%). El lodo se puede considerar un excelente medio para reponer el nitrógeno que el suelo pierde al ser cultivado.

El fósforo es otro elemento constitutivo de los lodos residuales y se considera como esencial. El contenido disponible da una referencia de la cantidad que puede ser tomado por las plantas e incluye todas las formas de fosfatos inorgánicos tales como los iones  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{-2}$ . El fósforo total reportó una concentración de 1.28% y 1.25%, con un contenido disponible de 0.29% y 0.16% en ambas muestras (**Tabla I**).

Los valores de los cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K) y de la capacidad de intercambio catiónico se reportan en la **tabla I**. El calcio compite en mayor proporción por las posiciones de intercambio, seguido de potasio, sodio y magnesio. La capacidad de intercambio catiónico es de 61.64 meq/100 g y 64 meq/100 g, considerada como alta y está relacionada principalmente con la materia orgánica. Como puede observarse en la **tabla I**, la suma de estos cationes no representa a la totalidad

de la capacidad de intercambio catiónico, lo que sugiere que pueden estar presentes otros cationes en el complejo de intercambio.

Los resultados del análisis de 9 metales se muestran en la **tabla II**. Las concentraciones más altas las ocupan el hierro (12,136 ppm) y el zinc (9,453 ppm), aunque también se presentan el cobre, el manganeso, el plomo, el cromo y el níquel en cantidades relativamente altas. Estos elementos posiblemente provienen de descargas industriales con efluentes de composición muy variable. En cuanto a los metales pesados disponibles (**Tabla II**), se distribuyen como sigue:

$\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Cr} = \text{Co} = \text{Cd}$

El porcentaje de recuperación con la solución extractante fue menor o igual al 7 %, lo que indica que sólo este porcentaje puede ser disponible para las plantas. Los metales que se presentaron en mayor concentración total y en más disponibilidad, son los esenciales para las plantas.

### Suelos

Los resultados del suelo antes de la adición de lodo, se muestran en las **tablas III** y **IV**. La textura corresponde a un suelo franco-arcilloso, con un pH ligeramente alcalino (7.4) y un porcentaje de materia orgánica de 3.3; rico en nitrógeno y fósforo; con una relación C/N de 10. La capacidad de intercambio catiónico se clasificó como media y los cationes que mayormente ocupan las posiciones de intercambio son el Ca, el Mg, el Na y el K.

### Cambios en el suelo después de la adición de lodo residual

De acuerdo con un análisis de varianza, el pH presentó diferencias significativas, ya que cambió de ligeramente alcalino a ligeramente ácido (7.23 a 6.82). La conductividad eléctrica mostró diferencias entre ciclos, debido a la acumulación de

**TABLA III.** ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE SUELOS CON LODOS RESIDUALES DE LAS PARCELAS AGRÍCOLAS, CICLOS 1 Y 2 (VALORES PROMEDIO DE 3 REPETICIONES)

Parámetro	S <sub>(0)</sub> ciclo 1	S <sub>(0)</sub> ciclo 2	S <sub>(1)</sub> ciclo 1	S <sub>(1)</sub> ciclo 2	S <sub>(5)</sub> ciclo 1	S <sub>(5)</sub> ciclo 2	ANOVA
% arcillas	40.00	36.00	39.00	37.00	39.00	38.00	NS
% limos	35.00	33.00	34.00	35.00	33.00	33.00	NS
% arenas	25.00	31.00	27.00	28.00	28.00	29.00	NS
pH	7.23	7.10	6.89	6.84	6.88	6.89	*
CE (mS/cm)	0.16	0.23	0.23	0.24	0.22	0.24	NS
CIC (meq/100 g)	45.00	53.00	47.00	52.00	51.00	49.00	*
Ca <sub>i</sub> (meq/100 g)	20.47	23.38	20.74	24.07	20.66	20.66	NS
Mg <sub>i</sub> (meq/100 g)	12.15	13.52	12.97	13.48	13.95	13.90	NS
Na <sub>i</sub> (meq/100 g)	0.56	0.63	1.11	0.85	1.12	1.12	NS
K <sub>i</sub> (meq/100 g)	0.74	0.76	1.35	1.28	2.03	—	NS
P disponible (ppm)	115.00	93.00	150.00	160.00	172.00	150.00	*
P total (ppm)	1700.00	1636.00	1800.00	1777.33	1736.00	1739.00	*

S<sub>(0)</sub> suelo de parcela testigo, ciclos 1 y 2; S<sub>(1)</sub> suelo de parcela de 1 ton/ha, ciclos 1 y 2; S<sub>(5)</sub> suelo de parcela de 5 ton/ha, ciclos 1 y 2; ANOVA = Análisis de varianza a  $\alpha = 0.05$ ; NS = no significativo;

\* estadísticamente significativo

TABLA IV. CONTENIDO DE METALES TOTALES Y DISPONIBLES DE LOS SUELOS CON LODOS RESIDUALES DE LAS PARCELAS AGRÍCOLAS, CICLOS 1 Y 2 (VALORES PROMEDIO DE 3 REPETICIONES)

Metal	S <sub>(0)</sub> ciclo 1	S <sub>(0)</sub> ciclo 2	S <sub>(1)</sub> ciclo 1	S <sub>(1)</sub> ciclo 2	S <sub>(5)</sub> ciclo 1	S <sub>(5)</sub> ciclo 2	L.M.P.
Metales disponibles (ppm)							
Hierro	140.60	97.00	117.33	113.67	108.00	131.67	1,000.00
Manganeso	30.00	23.33	34.00	26.67	41.33	43.33	500.00
Zinc	30.00	34.00	35.67	38.33	50.33	47.67	100
Cobre	13.67	13.33	12.84	12.67	12.06	13.00	100
Níquel	0.77	1.80	2.07	2.15	2.24	2.14	—
Metales totales (ppm)							
Hierro	33700.00	32900.00	43100.00	46800.00	42100.00	41400.00	200,000.00
Zinc	93.00	96.00	111.00	108.67	110.00	115.33	300.00
Manganeso	763.67	732.33	816.33	795.00	849.00	835.67	3,000.00
Cobre	34.57	41.67	37.33	42.33	39.83	55.67	100.00
Plomo	20.00	20.00	25.05	26.40	26.82	27.20	200.00
Níquel	116.67	127.00	121.67	133.33	124.67	110.67	500.00
Cromo	79.00	78.00	82.00	84.67	86.33	87.33	1,000.00
Cobalto	61.33	71.77	61.33	80.67	86.33	87.33	100.00

S<sub>(0)</sub> suelo de parcela testigo, ciclos 1 y 2; S<sub>(1)</sub> suelo de parcela de 1 ton/ha, ciclos 1 y 2; S<sub>(5)</sub> suelo de parcela de 5 ton/ha, ciclos 1 y 2; L.M.P. = Límite máximo permitido en suelos vertisoles. Las concentraciones disponibles del Cd, Co, Cr y Pb, son menores que el límite de detección (0.02, 0.05, 0.05 y 0.11 respectivamente).

El análisis de varianza ( $\alpha = 0.05$ ) reporta resultados estadísticamente no significativos para todos los metales

sales solubles. Los valores máximos de conductividad eléctrica en suelos con adición de lodo son de 0.27 mS/cm y no se consideran con problemas de salinidad. Se presentaron aumentos estadísticamente significativos de la materia orgánica (Fig. 2), del nitrógeno total y orgánico (Fig. 3) y del fósforo disponible en el suelo. El aumento de la capacidad de intercambio catiónico sólo fue significativo después del segundo ciclo (Tabla III).

No existen diferencias significativas en la concentración total de elementos potencialmente tóxicos, aunque se observó una tendencia al incremento de los siguientes metales: Fe, Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, K, Na, Cr, Ni y Pb. Sin embargo, en su forma disponible, sólo aumentaron ligeramente Mn, Zn y Ni. El hierro y el cobre permanecieron sin cambios; el plomo, el cobalto y el cromo no se detectaron en el extracto. En ningún caso las concentraciones de metales en suelos alcanzaron el límite máximo

del intervalo normal para suelos agrícolas (Tabla IV).

#### Rendimiento del maíz

El rendimiento del maíz cultivado, coincidió con el promedio reportado para el municipio de Jiutepec (2.10 ton/ha en temporal, según INEGI 1996). En las parcelas con lodos residuales del experimento, se presentó un incremento estadísticamente significativo, principalmente en las de mayor dosis (Fig. 4).

#### Tejidos vegetales

Durante el crecimiento de las plantas de maíz, no se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad. Los resultados de los análisis químicos se muestran en las tablas V, VI y VII. Si se comparan estos resultados con los reportados por Kabata-Pendias y Kabata (1992), el contenido de los nutrientes esenciales para las plantas (N, P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Zn y Mn), se

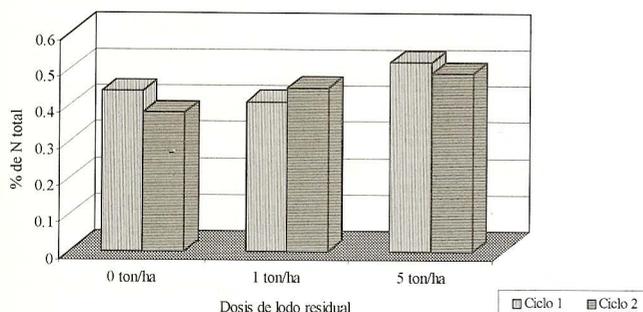


Fig. 2. Variación en el contenido de la materia orgánica en el suelo con la adición de lodos residuales

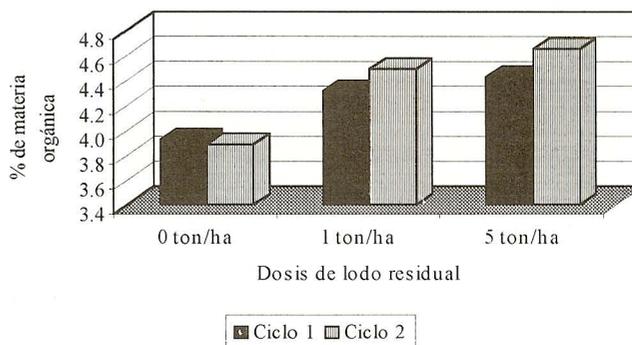


Fig. 3. Contenido de nitrógeno en los diferentes tratamientos y en los dos ciclos de cultivo

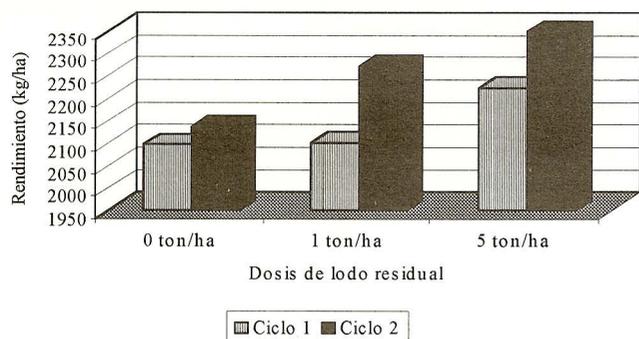


Fig. 4. Rendimiento del grano de maíz cultivado en parcelas con lodos residuales durante dos ciclos (promedio de tres repeticiones)

encuentra dentro del intervalo normal para maíz, excepto el hierro y el manganeso, que se detectaron en concentraciones más elevadas. Los metales potencialmente tóxicos (Cr, Pb, Ni, Cd y Co) no se detectaron en raíz, hojas y grano.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los lodos residuales analizados en este trabajo contienen altas cantidades de materia orgánica y nutrientes, así como concentraciones variables de elementos potencialmente tóxicos (con baja disponibilidad para las plantas). Por lo tanto, son una fuente potencial de nutrientes para las plantas y mejoradores de las características físicas de suelos.

Existen varias propiedades de los suelos que son importantes al considerar los efectos de aplicación de lodos residuales. Entre ellas se encuentran el pH, el contenido de arcillas, la capacidad de intercambio catiónico y el nivel de nutrientes disponibles. El pH es de los más importantes, ya que la mayoría de los metales pesados son solubles bajo condiciones ácidas.

Al final del experimento de campo, los suelos mostraron una mejoría en sus características de fertilidad, ya que se pre-

sentaron aumentos significativos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo total y disponible. Sin embargo, se presentó una tendencia a la disminución del pH y al aumento en el valor de la conductividad eléctrica, situación que puede causar disponibilidad de los metales pesados y generar presiones osmóticas altas que afecten el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, estos parámetros también deben tomarse en cuenta para posteriores adiciones.

El rendimiento del maíz cultivado con lodos residuales incrementó en proporción a la dosis de lodo adicionada (aumento de 226 kg/ha y de 212 kg/ha en el primero y segundo ciclos respectivamente, en la dosis más alta). En las plantas de maíz, no se detectaron niveles de micronutrientes en concentraciones más altas de las requeridas por las plantas, ni absorción de elementos potencialmente tóxicos. Estos resultados coinciden con los datos obtenidos de la concentración en su forma disponible en el suelo. Además, las plantas no disminuyeron su rendimiento y no se notaron síntomas de toxicidad durante su crecimiento.

Al dosificar la cantidad de lodo que se adicionó al suelo, se tomó en cuenta únicamente su contenido de metales pesados y el peligro de su introducción a la cadena alimentaria, demostrando que bajo estas condiciones no representaron riesgo para la planta o para sus consumidores. Sin embargo, debe considerarse también el contenido de otros elementos, tales como nitrógeno y fósforo, que en grandes cantidades representan peligro para el ambiente y la salud. De acuerdo con Smith (1996), el nitrógeno y el fósforo causan eutroficación en cuerpos de agua superficiales, provocando la muerte de animales y plantas acuáticas, el desarrollo de zonas anaerobias, el incremento en la población de parásitos y la aparición de olores y sabores no deseados en aguas para recreación y potables. A nivel de salud, el exceso de nitratos causa la metahemoglobinemia.

El nitrógeno que se aplicó a través de los lodos residuales, fue suficiente para soportar el crecimiento del cultivo (251.5 kg/ha y 246.50 kg/ha en el primero y segundo ciclo, respectivamente). De acuerdo con Tisdale y Nelson (1982), para cultivar

TABLA V. NUTRIENTES Y METALES PESADOS EN LA RAÍZ DEL MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES, CICLOS 1 Y 2 (VALORES PROMEDIO DE 3 REPETICIONES)

Nutrientes y metales pesados (ppm)	0 ton/ha ciclo 1	0 ton/ha ciclo 2	1 ton/ha ciclo 1	1 ton/ha ciclo 2	5 ton/ha ciclo 1	5 ton/ha ciclo 2
Nitrógeno	700.00	920.00	2170.00	2700.00	4000.00	3500.00
Fósforo	1800.00	1900.00	3400.00	1720.00	1390.00	1950.00
Magnesio	360.00	385.00	640.00	380.00	355.00	410.00
Potasio	640.00	720.00	925.00	980.00	1075.00	1050.00
Hierro	1445.00	1250.00	2522.00	1800.00	772.00	2200.00
Zinc	16.00	35.00	85.00	58.00	73.00	69.00
Manganeso	34.00	40.00	67.00	35.00	35.00	45.00
Cobre	<<0.002	8.00	12.00	12.00	21.00	20.00

Las concentraciones de Ni, Cd, Co, Cr y Pb son menores que el límite de detección (0.005, 0.02, 0.05, 0.05 y 0.11, respectivamente)

TABLA VI. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS HOJAS DEL MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES, CICLOS 1 Y 2 (VALORES PROMEDIO DE 3 REPETICIONES)

Nutrientes y metales pesados (ppm)	0 ton/ha ciclo 1	0 ton/ha ciclo 2	1 ton/ha ciclo 1	1 ton/ha ciclo 2	5 ton/ha ciclo 1	5 ton/ha ciclo 2
Nitrógeno	1250.00	10300.00	4900.00	4580.00	11300.00	10300.00
Fósforo	980.00	950.00	3400.00	1200.00	600.00	1150.00
Magnesio	1700.00	1590.00	1382.00	1490.00	1665.00	1700.00
Potasio	2845.00	2850.00	3050.00	3050.00	2927.00	2845.00
Hierro	1310.00	550.00	637.00	686.00	182.00	720.00
Zinc	77.00	52.00	86.00	76.00	32.00	81.00
Manganeso	40.00	35.00	24.58	32.00	33.50	34.00
Cobre	91.00	88.00	125.00	95.00	50.00	88.00

Las concentraciones de Ni, Cd, Co, Cr y Pb son menores que el límite de detección (0.005, 0.02, 0.05, 0.05 y 0.11, respectivamente)

una hectárea de maíz se necesitan 223 kg de N, con lo cual la cantidad adicionada es mayor. De esta manera, considerando que las concentraciones de metales pesados son bajas, comparativamente con los lodos que generan otras plantas de tratamiento de aguas (Sommers 1977, Sterrit y Lester 1981, Blomfield y McGareth 1982, y Lester 1987a y b), el elemento limitante en la adición de estos lodos es el nitrógeno.

Los suelos en general presentan gran variabilidad en sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas, que van a influir en la respuesta de aplicación de lodo. De la misma forma, cada planta de tratamiento produce lodos con características diferentes, incluyendo una concentración alta de metales pesados, que en ese caso sería una limitante para su aplicación. Asimismo, cada especie de planta que se cultiva sobre suelos con adición de lodos residuales, reaccionará de manera diferente. Debido a estas características, la aplicación indiscriminada de lodos al suelo donde se cultivan plantas destinadas a la alimentación de ganado o para consumo humano, puede ser peligroso. Por lo tanto, su uso con fines agrícolas debe llevarse a cabo después de haber caracterizado al

lodo, con la finalidad de dosificar su aplicación, sin causar problemas de contaminación a suelos y mantos acuíferos.

## REFERENCIAS

- Arroyo J. y Molina M. (1990). Programa nacional de reutilización del agua. Memorias del 11o. Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo I. Asociación Mexicana de Hidráulica. Querétaro, Querétaro.
- Aubert H. y Pinta M. (1977). *Trace elements in soils*. Developments in Soils Science 7. Elsevier Scientific Publishing. Amsterdam.
- Bloomfield C. y McGareth P. (1982). A comparison of the extractabilities of Zn, Cu, Ni and Cu from sewage sludges prepared by treating raw sewage with the metal salts before and after anaerobic digestion. *Environ. Pollut.*, 6, 193-197.
- Calcutt T. y Moss J. (1984). Sewage sludge, treatment and disposal - the way ahead. *Water Pollut. Control*. 83, 194-198
- Chang C., Granato, T. C. y Page L. (1992). A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges.

TABLA VII. ANÁLISIS DEL GRANO DEL MAÍZ CULTIVADO CON LODOS RESIDUALES, CICLOS 1 Y 2 (VALORES PROMEDIO DE 3 REPETICIONES)

Nutrientes y metales pesados (ppm)	0 ton/ha ciclo 1	0 ton/ha ciclo 2	1 ton/ha ciclo 1	1 ton/ha ciclo 2	5 ton/ha ciclo 1	5 ton/ha ciclo 2
Nitrógeno	14280.00	12740.00	14720.00	13540.00	13800.00	14200.00
Fósforo	7900.00	6300.00	8300.00	6800.00	7500.00	7800.00
Magnesio	1020.00	1040.00	1027.00	1035.00	1045.00	1050.00
Potasio	2560.00	3128.00	4125.00	2860.00	3280.00	3590.00
Hierro	316.00	349.00	237.00	320.00	350.00	360.00
Zinc	57.00	63.00	39.00	45.00	50.00	61.00
Manganeso	45.00	34.58	32.50	32.00	35.00	31.00
Cobre	8.00	8.00	10.00	8.00	10.00	8.00

Las concentraciones de Ni, Cd, Co, Cr y Pb son menores que el límite de detección (0.005, 0.02, 0.05, 0.05 y 0.11, respectivamente)

- J. Environ. Qual.* 21, 521-536.
- Diario Oficial de la Federación (23 de octubre de 1993). Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/93.
- EPA (1977). Municipal-sludge management. Environmental factors. EPA/430/9-77-004. Technical Bulletin MCD 28. USEPA, Washington, D.C.
- EPA (1988). Samples procedures and protocols for the national sewage sludge survey. Office of Water Regulations and Standards, WH-522, Washington D.C.
- GBC (1995). Operation manual for 908/909 spectrometers. GBC Scientific Equipment Pty Ltd. Australia
- Gerba P. (1983). Pathogens. En: *Utilization of municipal wastewater and sludge on land*. (L. Page, G. Thomas, E. Smith, K. Iskandar y L. Sommers, Eds.). University of California, Riverside.
- Gutiérrez M. E. (1994). Comunicación personal.
- Hendrix G. W. y Buckley J.A.D (1992). Use of a geographic information system for selection of sites for land application of sewage waste. *J. Soil Water Cons.* 271-275
- Horvath D. J., Keefer R. F. y Singh R. N. (1983). Effects on soils and vegetation of plants nutrients and heavy metals from wastewater-treatment-plant sludges disposed on land. Technical Completion Report. Water Research Institute, West Virginia University. Project. A-025-WVA.
- INEGI (1996). Anuario estadístico del Estado de Morelos. Gobierno del Estado de Morelos, México.
- Kabata-Pendias A. y Pendias H. (1992). *Trace elements in soils*. 2<sup>nd</sup> Edition. CRC Press. Boca Raton.
- Lester N. (1987a). *Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes*. Vol. I Sources, Analysis and Legislation. CRC Press, Boca Raton.
- Lester N. (1987b). *Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes*. Vol. II Treatment and disposal. CRC Press. Florida, Boca Raton
- MAFF (1994). Ministre of Agriculture, Fisheries and Food. Consultation Document. Designatio of vulnerable zones in England and Wales under the E.C. nitrate directive (91/676) PB 1715-MAFF. Londres.
- Ortiz L., Sánchez S. E. y Gutiérrez R.M. (1993a). Análisis de suelos: fundamentos y técnicas, Parte I. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
- Ortiz L., Sánchez S. E. y Gutiérrez R.M. (1993b). Análisis de suelos: fundamentos y técnicas, Parte II. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
- Ortiz L., Gutiérrez R.M y Sánchez S. E. (1995). Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 11, 105-115
- Page L., Logand T. y Ryan J. (1987). *Land application of sludge*. Lewis Publishers, Chelsea, 133 p.
- Reyes P. (1980). *Bioestadística aplicada*. Trillas. México, D.F., México, 216 p.
- Sánchez E. y Ortiz L. (1989). Efecto de las aguas industriales tratadas sobre suelos agrícolas en el estado de Morelos. Informe Interno, Universidad Autónoma del Estado de Morelos
- Shen T. (1979). Air pollutant from sewage sludge incineration. *J. Environ. Eng. Division.* 195, 720-724.
- Smith S. R. (1996). Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. CAB International. UK. 382 p.
- Sommers L. (1977). Chemical composition de sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. *J. Environ. Qual.* 6, 225-230.
- Sterrit M. y Lester N. (1981). Concentration of heavy metals in forty sewage sludges in England. *Water Air Soil Pollut.* 14, 125-131.
- USSLS (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S. Dept. Agr. Handbook 60.