

## METALES PESADOS EN MAÍZ (*Zea mays* L.) CULTIVADO EN UN SUELO ENMENDADO CON DIFERENTES DOSIS DE COMPOST DE LODO RESIDUAL

Gabriela CUEVAS e Ingrid WALTER

Departamento de Medio Ambiente. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Agroalimentaria, INIA, Apartado de correos 8111, 28080 Madrid. España. Correo electrónico: walter@inia.es

(Recibido febrero 2003, aceptado enero 2004)

Palabras clave: maíz, compost de lodo residual, absorción de nutrientes, metales pesados, producción de materia seca

### RESUMEN

Se realizó una experiencia de campo de dos años de duración para estudiar la absorción y la distribución de metales pesados (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb y Cr) en plantas de maíz (*Zea mays* L.) cultivadas en un suelo calcáreo que fue enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. También se analizaron los metales asimilables en el suelo extraídos con ácido dietilentriamino pentaacético (DTPA) con el fin de determinar el efecto residual y la movilidad de estos elementos en el suelo a lo largo del perfil. Los resultados obtenidos indicaron que la cantidad de metales pesados aportados por el compost no representó, en nuestras condiciones experimentales, ningún riesgo para el buen desarrollo del maíz y que los contenidos de estos en las diferentes partes de la planta no superaron el umbral de tolerancia que pudiera causar efectos tóxicos al ser consumidos por el ganado. La concentración de los metales asimilables en el suelo no mostró diferencias significativas entre los tratamientos con compost y estos no fueron diferentes significativamente con respecto al fertilizante mineral. La baja movilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados encontrada se debieron principalmente a las características físicas y químicas del suelo. La aplicación del compost como enmienda orgánica-mineral a un suelo de las características del presente estudio (alto valor en  $\text{CaCO}_3$ ) no afecta la calidad de la planta de maíz ni causa problemas ambientales a corto plazo.

Key words: corn plants, sewage sludge compost, nutrient uptake, heavy metals, dry matter yield

### ABSTRACT

A 2-year field study was performed to evaluate heavy metals (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb and Cr) uptake and their distribution in corn plants (*Zea mays* L.) grown on a calcareous soil amended with different rates of sewage sludge compost. Residual soil heavy metals effect was also determined along different depths (0-20, 20-40, 40-60 and 60-80 cm). The values obtained for dry matter and for heavy metal concentrations in the different plant parts, did not show significant differences among treatments. Heavy metals concentrations in plant tissues from the compost amended soil were below the tolerance threshold for livestock. Application of compost did not increase significantly the availability of heavy metals (Diethylenetriaminepentaacetic acid [DTPA]-extractable soil metals) and none of them leached from the surface of the soil to groundwater. The low mobility observed could be due to soil characteristics. There was limited transfer of heavy metals from the soil to the corn plants. A short-term application of compost to a calcareous soil did not cause problems to corn plant growth and quality nor to the environment.

---

## INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas ambientales que el hombre tiene que afrontar y solucionar es la gestión de los diferentes residuos que genera. La depuración de las aguas residuales urbanas por medio de distintas técnicas origina residuos orgánicos que reciben la denominación de lodos de depuradora o biosólidos. En España se estima que la producción anual de estos residuos es de alrededor de cuatro millones de toneladas en peso seco. Uno de sus posibles destinos es su utilización en suelos agrícolas. La aplicación de estos residuos para este fin, implicaría la solución de dos problemas ambientales i) la reducción de una fuente potencial de contaminación y ii) el aprovechamiento de un recurso de bajo coste que permite mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo, es decir, aumentar su productividad.

El uso agrícola de estos residuos orgánicos, ya sea de forma directa o transformados en productos con alto contenido de materia orgánica estabilizada (compost) ha conducido a la valoración de estos materiales, fundamentalmente en lo relativo a su capacidad de mejorar la calidad y la cantidad de la materia orgánica (valor como enmienda) y el contenido de nutrientes (valor fertilizante) de suelos agrícolas agotados.

El contenido de los metales pesados puede ser un factor limitante para la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas (Logan *et al.* 1997). Entre los metales pesados más comúnmente encontrados están Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, y Pb. Algunos de ellos como el Cu y el Zn son elementos esenciales para la planta y su deficiencia puede provocar problemas en los cultivos, mientras que si se encuentran en exceso implican riesgos de toxicidad. Los otros, no tienen funciones fisiológicas reconocidas y su presencia en el suelo siempre será un riesgo potencial, ya sea para las plantas o para los consumidores (Costa *et al.* 1987). Por ello en todos los países que utilizan los biosólidos como enmienda orgánico-mineral, se ha legislado su uso para no producir daños ambientales mayores de los que se pretenden remediar.

No obstante, su aplicación deberá realizarse de un modo controlado y desde el conocimiento de todas las variables que puedan intervenir en el sistema; es necesario considerar las restricciones ambientales y la aptitud de los suelos y los cultivos para evitar consecuencias no deseadas. La utilización de estos residuos no debe acarrear un aporte excesivo de macronutrientes y metales pesados que pueda contaminar, a las aguas superficiales o subterráneas por escorrentía o por lixiviación. Además, deberá tenerse en cuenta la transferencia de los metales pesados a las diferentes partes de las plantas.

La superficie de cultivo de maíz forrajero en el sureste de la Comunidad de Madrid ha aumentado en los últimos años, por lo que representa una buena oportunidad

para reciclar estos residuos, debido a que en esta zona se encuentran varias depuradoras de aguas residuales y plantas de compostaje con el consiguiente ahorro de transporte que esto supone. Estos compuestos orgánicos tienen a su vez un beneficio adicional frente a los fertilizantes minerales, ya que no sólo proporcionan nutrientes al cultivo de forma inmediata (formas inorgánicas) sino que son capaces de liberarlos de forma progresiva (formas orgánicas); en consecuencia, pueden ser aprovechados mejor por la planta y también, dependiendo de su contenido, por cultivos sucesivos (Parkinson *et al.* 1999). Fuller *et al.* (1996) han observado un aumento significativo en la producción de maíz para forraje cuando se aplican 50 Mg ha<sup>-1</sup> de compost de lodo residual, con alto contenido en metales pesados. Por otro lado, Hill *et al.* (1996) no han encontrado diferencias significativas en la absorción de metales en plantas de maíz, entre el testigo y los tratamientos aplicados con 25 y 50 Mg ha<sup>-1</sup> de compost.

La concentración total de los metales pesados en el suelo es un valor muy útil como índice global de contaminación, pero informa poco con respecto a su movilidad y biodisponibilidad. Sin embargo, la determinación de los metales pesados extraídos con reactivos químicos más suaves, capaces de extraer las fracciones más solubles de estos, que comúnmente se consideran como "potencialmente asimilables", da valores más acordes con su comportamiento en el suelo (McBride 1995). Las soluciones químicas utilizadas con más frecuencia para la determinación de los metales asimilables son los agentes quelantes y de éstos, el ácido dietilentriamino pentaacético (DTPA) es el más recomendado para suelos calcáreos (Lindsay y Norvel 1978).

Los objetivos de este estudio fueron (i) evaluar los efectos de un compost de lodo de depuradora en diferentes dosis y modos de aplicación sobre la distribución de los metales pesados en los distintos tejidos de la planta de maíz (*Zea mays* L. cv. Florencia) y (ii) determinar el efecto residual de estos metales a lo largo del perfil del suelo, en una experiencia de campo de dos años de duración.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio y diseño experimental

La experiencia de campo se realizó en la zona sureste de la Comunidad de Madrid, en una parcela agrícola cedida por el Ayuntamiento de San Martín de la Vega. Los suelos de la zona se clasifican en *Fluvents* dentro del orden de los entisoles (SSS 1998). Los suelos no presentan ningún tipo de limitación para su cultivo, destacándose los cultivos herbáceos en regadío y, de estos, el maíz es el que ocupa mayor porcentaje de tierra cultivada. El río Jarama, a través de sus acequias y canales riega toda esta zona.

La zona se caracteriza por un clima mediterráneo templado seco, con una precipitación media anual de 400 a 500 mm, siendo la evapotranspiración muy alta en los meses de verano.

La parcela de estudio fue dividida en cuatro partes lo más homogéneamente posible, representando cada una de éstas un bloque. Cada bloque fue subdividido en seis subparcelas (100 m<sup>2</sup>) a las que se les aplicaron los tratamientos indicados en la **tabla I**, distribuidos al azar. Para evitar posibles efectos de contaminación por vecindad, se realizaron grandes pasillos y surcos para separar las parcelas y los bloques, respectivamente.

**TABLA I.** TRATAMIENTOS APLICADOS EN LA EXPERIENCIA

Tratamiento	Descripción
T1	Testigo, fertilización mineral aplicada en semenera a razón de 600 kg/ha (N,P,K: 8,15,15) y 100 kg/ha de nitrato amónico cálcico 27 % N en cobertera.
T2	30 Mg/ha de compost en semenera.
T3	15 Mg/ha de compost en semenera y la misma cantidad en cobertera.
T4	60 Mg/ha de compost en semenera.
T5	30 Mg/ha de compost en semenera y la misma cantidad en cobertera.
T6	30 Mg/ha de compost en semenera y 100 kg/ha de nitrato amónico cálcico 27 % N en cobertera.

La aplicación del abono orgánico y la fertilización mineral en semenera (aplicados e incorporados inmediatamente en los primeros 15 cm del suelo mediante un arado de vertedera) se realizó en la primera semana de junio del año 1999 y a mediados de este mes se sembró el maíz (*Zea mays*) variedad de ciclo corto, "Florenxia". El abono orgánico y la fertilización inorgánica en cobertera (aplicados sobre la superficie del suelo) se realizó veinte días después de la germinación. En diciembre, cuando el grano estuvo completamente maduro, el maíz fue cosechado y se obtuvieron los rendimientos en grano por tratamientos. Para ello, se cosechó únicamente la parte central de cada parcela, eliminando de esta forma el efecto borde. Se calculó la producción de grano seco en kg ha<sup>-1</sup> (referida a 14% de humedad).

En el segundo año se cultivó el maíz sin ningún agregado de fertilización orgánica ni inorgánica, siendo la siembra y la cosecha aproximadamente en las mismas fechas que el año anterior.

Todas las labores propias del cultivo fueron realizadas según el uso de los agricultores de la zona y estuvieron marcadas por las condiciones climáticas.

Los riegos (tipo manta) fueron realizados durante los meses estivales, tomando el agua de la acequia del Jarama. Se regó individualmente cada parcela para evitar posibles contaminaciones. La calidad del agua de rie-

go, según los análisis realizados (valor medio de 6 muestras recogidas durante la época de riego), pertenece a la clase C2-S2 (USDA 1954); es decir, son aguas con salinidad media y con contenidos medios de sodio que se pueden aplicar sin problemas en suelos con textura media y permeabilidad alta, condiciones similares al tipo de suelo utilizado en el presente estudio.

### Suelo y compost

Se tomaron muestras de suelo, a distintas profundidades a lo largo del perfil, durante el periodo que duró la experiencia. El primer muestreo se realizó con anterioridad a la aplicación del residuo (año 0), el segundo después de la primera cosecha (año 1) y el tercero al terminar la segunda cosecha (año 2). Se sacaron 4 muestras, compuestas por 12 submuestras, por parcela. Cada muestra representaba una profundidad en el suelo (0 a 20 cm, 20 a 40 cm, 40 a 60 cm y 60 a 80 cm). Antes del análisis las muestras se homogeneizaron, se secaron al aire y se tamizaron con una malla de 2 mm. Las técnicas seguidas para determinar las principales características físico-químicas se realizaron según los métodos oficiales de análisis del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPA 1994). Los metales pesados asimilables fueron extraídos con DTPA (Lindsay y Norvel 1978) y los metales en solución se determinaron por espectrometría de emisión de plasma ICP (Perkin Elmer AEE 400).

El compost de lodo utilizado proviene de una mezcla de lodos anaeróbicos generados por 5 plantas depuradoras de aguas residuales del Ayuntamiento de Madrid que han sido compostados y estabilizados durante más de tres meses y cumple con los requisitos establecidos por la reglamentación española referente al uso agrícola de lodos de depuradora. Los principales parámetros agronómicos se hicieron según Walter *et al.* (1989) y se encuentran reflejados en la **tabla II**.

### Tejidos vegetales

De cada parcela se tomaron 12 plantas de maíz completas, al azar. Se separaron la raíz, el tallo, las hojas y la

**TABLA II.** PARÁMETROS AGRONÓMICOS MÁS IMPORTANTES Y CONTENIDO DE METALES PESADOS EN EL COMPOST UTILIZADO

Parámetros	Metales pesados (mg/kg)			
	Totales	Asimilables		
pH (suelo:agua 1:2.5)	7.7	Zn	1635	77.8
C.E. (dS/m) a 25 °C	5.25	Pb	385	6.70
Materia orgánica total (%)	14.4	Ni	79.6	1.52
N total (%)	1.68	Cr	468	0.20
P total (%)	2.6	Cu	460	11.2
K total (%)	0.40			
N-NH <sub>4</sub> (mg/kg)	50			
N-NO <sub>3</sub> (mg/kg)	227			

mazorca y exceptuando esta, los demás tejidos vegetales fueron primero lavados cuidadosamente con agua destilada para eliminar cualquier resto de suelo y polvo y después se lavaron con agua bidestilada. La mazorca fue desgranada y todos los tejidos fueron secados a 60 °C en estufa con circulación de aire, hasta peso constante. Las diferentes partes de la planta: raíz, tallo, hojas, zuro (mazorca desgranada) y grano fueron molidos previo al análisis. Se determinaron los principales macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. El N se determinó por combustión seca a través de un analizador LECO (CHN 600); los demás nutrientes, junto con los metales pesados (zinc, cobre, plomo, cadmio, níquel y cromo) se detectaron por digestión con HNO<sub>3</sub> concentrado en microondas. Todos los elementos en solución fueron cuantificados por espectrofotometría de emisión de plasma ICP (Perkin Elmer AEE 400).

### Análisis estadísticos

Se realizó un análisis descriptivo de todos los datos obtenidos, un análisis de varianza (ANOVA) y la correspondiente comparación de medias empleando la prueba de Duncan para un nivel de probabilidad de 5 % ( $P \leq 0.05$ )

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características del suelo antes de comenzar el ensayo (año 0) se presentan en la **tabla III**. Como no se obtuvieron diferencias significativas entre las parcelas, los datos corresponden al valor medio de las 24 parcelas. La característica más relevante encontrada en este suelo es la presencia de alto contenido de fósforo asimilable debido, probablemente, a anteriores fertilizaciones minerales.

### Metales pesados asimilables en el perfil del suelo

En la **tabla IV** se encuentran los contenidos de los metales pesados asimilables, extraídos con DTPA, para los tratamientos aplicados, en las diferentes profundidades del suelo y para los tres muestreos realizados en los dos años del estudio. En ella se observa que los valores obtenidos son en general bajos y así permanecen durante todo el período de la experiencia. La concentración de los metales pesados en los diferentes tratamientos aplicados no aumentó significativamente respecto a los valores obtenidos en el suelo testigo (año 0) y tampoco se han observado diferencias significativas entre los tratamientos realizados. Esto indica que las distintos dosis de compost añadidas no provocaron aumento significativo de los metales pesados extraídos con DTPA. La concentración de estos metales en el suelo antes de la aplicación de los diversos tratamientos era mayor en la capa superficial y los valores disminuían a lo largo del perfil.

**TABLA III.** VALOR MEDIO (n = 24) DE LOS DIFERENTES PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO A DISTINTAS PROFUNDIDADES DEL MISMO (AÑO CERO)

Parámetros	Profundidad (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
pH:2.5 suelo/H <sub>2</sub> O	7.7	7.8	8.0	8.2
Conductividad Eléctrica dS/m	0.139	0.130	0.138	0.134
CaCO <sub>3</sub> %	14	18	34	41
Materia orgánica oxidable g/kg	10.2	10.7	6.70	3.80
Fósforo asimilable mg/kg	42.30	41.27	31.64	26.96
N-NH <sub>4</sub> mg/kg	0.54	0.58	1.06	1.14
N-NO <sub>3</sub> mg/kg	4.52	2.72	2.43	1.90
Metales pesados extraídos con DTPA		mg/kg		
Zn	3.49	3.61	2.48	0.78
Pb	1.55	1.56	1.05	0.47
Cd	0.08	0.08	0.06	0.03
Ni	0.42	0.44	0.28	0.09
Cr	nd	nd	nd	nd
Cu	1.23	1.26	0.88	0.37

nd: no detectado

Este mismo comportamiento, como era de esperar, fue observado tanto en el primero como en el segundo año de estudio, por lo que se puede deducir que no hubo migraciones de los metales a las capas inferiores a pesar del riego aplicado. Esto representa una gran ventaja, ya que ni los elementos más móviles, como Cd y Zn y en menor medida Ni, mostraron un riesgo de contaminación para las aguas subterráneas debido, principalmente, a la baja lixiviación de los mismos. La concentración de Cr no fue detectada (valor por debajo del límite de detección del instrumento utilizado para su determinación, 0.08 mg kg<sup>-1</sup>) en ninguno de los tratamientos y fechas de muestreos realizadas. Esto demuestra la baja solubilidad de este elemento, que generalmente se encuentra fuertemente retenido en la fracción más resistente del suelo, por lo tanto no está disponible o asimilable para las plantas (Walter y Cuevas 1999). El motivo de que no se haya observado aumento significativo en los metales pesados extraídos con DTPA, a pesar de la cantidad de metales añadida con los tratamientos con compost, fue debido, probablemente, a las características del suelo ensayado. Los metales quedan retenidos en los componentes orgánicos e inorgánicos del suelo (adsorbidos y/o precipitados), situación que es favorecida por el pH y el contenido de carbonatos del suelo, por lo que no son extraídos con DTPA al menos durante el periodo de este estudio. Datos similares fueron encontrados por Snyman *et al.*

**TABLAIV.** VALORES MEDIOS DE LOS METALES PESADOS (mg/kg), EXTRAÍDOS CON DTPA, EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS, A DISTINTAS PROFUNDIDADES Y PARA LAS TRES FECHAS DE MUESTREO

Tratamientos	Profundidad (cm)							
	0-20		20-40		40-60		60-80	
	1 año	2 año	1 año	2 año	1 año	2 año	1 año	2 año
Cadmio mg/kg								
T1	0.14	0.12	0.14	0.16	0.06	0.08	0.04	0.02
T2	0.12	0.12	0.12	0.06	0.06	0.04	0.04	0.02
T3	0.20	0.12	0.20	0.14	0.08	0.06	0.02	0.02
T4	0.18	0.12	0.20	0.12	0.10	0.10	0.04	0.04
T5	0.16	0.12	0.16	0.12	0.10	0.06	0.04	0.02
T6	0.14	0.10	0.12	0.12	0.06	0.06	0.02	0.02
Media año 0	0.16		0.16		0.12		0.06	
Zinc mg/kg								
T1	11.0	5.6	9.6	5.2	3.0	2.4	1.2	0.7
T2	7.2	6.6	6.6	5.2	3.0	2.7	1.2	0.9
T3	10.6	6.6	10.4	6.0	5.6	2.7	1.0	0.7
T4	13.6	6.4	8.4	6.0	3.6	3.8	1.4	1.0
T5	9.2	7.0	7.8	6.6	3.6	4.0	1.4	1.2
T6	8.2	6.0	6.8	5.0	2.6	2.7	1.2	0.6
Media año 0	7.0		7.2		5.0		1.6	
Cobre mg/kg								
T1	4.04	1.52	3.78	1.62	1.18	0.82	0.56	0.34
T2	2.46	1.56	2.60	1.48	1.00	0.76	0.50	0.40
T3	3.60	1.48	3.66	1.56	1.78	0.84	0.46	0.38
T4	4.86	1.56	3.20	1.68	1.50	1.12	0.58	0.52
T5	3.24	1.64	2.98	1.74	1.34	1.14	0.50	0.52
T6	2.80	1.40	2.44	1.42	0.98	0.86	0.44	0.30
Media año 0	2.46		2.52		1.76		0.74	
Niquel mg/kg								
T1	1.30	0.30	1.08	0.26	0.34	0.20	0.16	0.12
T2	0.80	0.28	0.68	0.28	0.28	0.20	0.14	0.08
T3	1.12	0.28	1.20	0.28	0.60	0.20	0.10	0.10
T4	1.24	0.22	0.96	0.22	0.26	0.16	0.12	0.10
T5	0.86	0.26	0.82	0.26	0.34	0.24	0.12	0.12
T6	0.86	0.26	0.78	0.26	0.24	0.20	0.10	0.08
Media año 0	0.84		0.88		0.56		0.18	
Plomo mg/kg								
T1	4.86	2.28	4.38	1.80	1.46	1.08	0.86	0.62
T2	2.86	2.12	2.64	2.12	1.12	1.06	0.50	0.54
T3	4.18	1.50	4.54	1.64	2.16	1.18	0.52	0.56
T4	4.64	2.08	3.80	2.24	1.96	1.44	0.72	0.62
T5	3.42	2.30	3.10	2.24	1.52	1.46	0.68	0.72
T6	3.16	2.12	2.96	2.00	1.08	1.24	0.58	0.58
Media año 0	3.10		3.12		2.10		0.94	

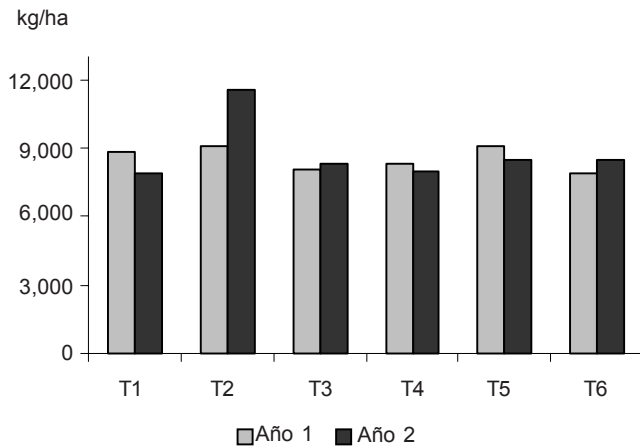
(1998) en un estudio con maíz en un suelo franco limoso y con aplicaciones de hasta 72 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo residual estabilizado.

**Materia seca en los diferentes tejidos del maíz**

Las producciones de grano de maíz obtenidas en las distintas parcelas, para los dos años de estudio, se reflejan en **figura 1**. El resultado del análisis estadístico de los datos indica que no hay diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los dos años. Esto sugiere que el compost no presentó efecto adverso sobre la producción de grano, resultado coincidente con los obtenidos por Parkinson *et al.* (1999) en un estudio de tres

años de duración cultivando maíz forrajero con 15, 30 y 60 Mg ha<sup>-1</sup> de compost con y sin aplicación de fertilizante mineral. La producción de grano obtenida fue semejante al valor medio que lograron los agricultores de la zona en los dos años.

La producción de materia seca de las distintas partes de la planta, en los diferentes tratamientos, para los dos años de estudio se muestra en la **tabla V**. Los valores representan el valor medio de doce plantas tomadas al azar de cada parcela y están expresados como gramos de materia seca por planta de maíz. Los datos obtenidos indican que tanto en el primer año como en el segundo, la producción de materia seca en los diversos tejidos no



**Fig. 1.** Producción de grano (kg/ha) en los diferentes tratamientos y para los dos años de estudio (al 14 % de humedad)

presentó diferencias significativas en ninguno de los tratamientos probados. Esto parece indicar que cualquiera de los tratamientos realizados con el compost puede sustituir a la fertilización mineral tradicional utilizada para este cultivo en la zona de estudio.

Comparando los resultados obtenidos en el primer año con los del segundo, se observó un aumento en el peso seco total de la planta en todos los tratamientos en este último año. Esto fue detectado, también *de visu*; la planta presentaba un mejor porte, con un mayor tamaño en el tallo y en la raíz, es decir, ambos tejidos experimentaron aumento de peso considerable respecto a los valores obtenidos en el primer año. Entre las posibles causas de este aumento de peso habría que destacar las diferen-

**TABLA V.** VALORES MEDIOS DE MATERIA SECA (GRAMOS POR PLANTA) PRODUCIDA EN LOS DISTINTOS TEJIDOS VEGETALES PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS EN LOS DOS AÑOS DE ESTUDIO

Tejido vegetal	Tratamiento						Media Compost
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
	g/planta						
<b>Primer año</b>							
Raíz	28	29	25	31	24	21	26
Tallo	45	62	47	56	56	46	53
Hojas	51	56	52	49	56	53	53
Mazorca	175	227	191	216	218	191	209
Zuro	28	27	24	29	28	24	27
Grano	147	200	167	187	190	167	182
Total	327	376	317	355	355	312	343
<b>Segundo año</b>							
Raíz	129	126	130	133	142	129	132
Tallo	92	113	86	94	95	103	98
Hojas	44	47	45	45	48	47	46
Mazorca	171	193	178	191	194	179	187
Zuro	22	25	23	22	25	22	23
Grano	149	168	155	169	169	157	164
Total	436	478	439	446	480	451	459

cias en las condiciones meteorológicas que hubo entre los dos años en el momento de sembrar y en las primeras etapas de desarrollo de la planta, siendo más favorables (menor temperatura y mayores precipitaciones) en el segundo año frente al primero.

### Macronutrientes

Los análisis de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en el grano de maíz indicaron que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos para ninguno de los macronutrientes analizados (**Tabla VI**). Se vuelve a corroborar aquí, desde el punto de vista nutricional, que cualquiera de los tratamientos aplicados con compost de lodo puede sustituir a la fertilización mineral.

**TABLA VI.** VALORES MEDIOS DE LAS CONCENTRACIONES DE N, P, K, Ca y Mg EN GRANO DE MAÍZ EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS PARA LOS DOS AÑOS DE ESTUDIO

Tratamiento	Año	N	P	K g/kg	Ca	Mg
T1	1	14.6	2.98	3.45	2.33	1.21
	2	14.4	1.10	4.23	2.51	5.68
T2	1	14.1	3.47	3.62	2.35	1.46
	2	13.3	1.56	4.35	2.19	5.17
T3	1	14.8	3.41	3.62	2.46	1.37
	2	13.6	1.62	4.09	2.37	5.99
T4	1	14.6	2.98	3.27	2.62	1.29
	2	13.9	1.01	4.49	2.37	5.74
T5	1	14.9	3.40	3.76	2.31	1.39
	2	13.9	1.35	4.67	2.49	7.33
T6	1	14.7	3.14	3.37	2.28	1.27
	2	17.7	1.65	3.76	2.10	6.79
Media Compost	1	14.6	3.28	3.53	2.40	1.35
	2	14.5	1.44	4.27	2.30	6.20

Las concentraciones de nitrógeno registradas en el grano (13 a 17 g kg<sup>-1</sup>) se encontraron dentro del intervalo adecuado para un cultivo de maíz (Dowdy 1995) y son similares a las halladas por Dumitri *et al.* (1997) en este cultivo con aplicación de lodo residuales. Para el fósforo no se observaron diferencias entre los tratamientos realizados, ni entre los años de estudio. Los valores medios obtenidos con todos los tratamientos con compost indicaron de forma general que en el segundo año el contenido de P en el grano fue superior al valor obtenido en el tratamiento mineral. También se detectó en el segundo año una disminución general del P en el grano. Esto pudo deberse a que este elemento interviene en los desarrollos radicular y del tallo. El peso de materia seca de estos dos tejidos fue sensiblemente mayor en el segundo año frente al primero (**Tabla V**), lo que pudo haber producido un menor transporte de este elemento hacia el grano, en el segundo año.

Los resultados del contenido de potasio en grano no presentaron diferencias significativas en los diversos tratamientos aplicados en los dos años de estudio. Los valores medios obtenidos en los diferentes tratamientos son similares dentro del mismo año, observándose un ligero aumento en el segundo año frente al primero. Los valores hallados en todos los tratamientos pueden considerarse bajos (Hormann *et al.* 1995). Esta deficiencia en K no es de extrañar ya que el contenido de este elemento en el compost aplicado es relativamente bajo.

Los valores obtenidos de calcio y magnesio tampoco mostraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos en los dos años de estudio. Las concentraciones de Ca en grano para los dos años fueron similares mientras que la concentración de Mg en el segundo año fue sensiblemente mayor que en el primero.

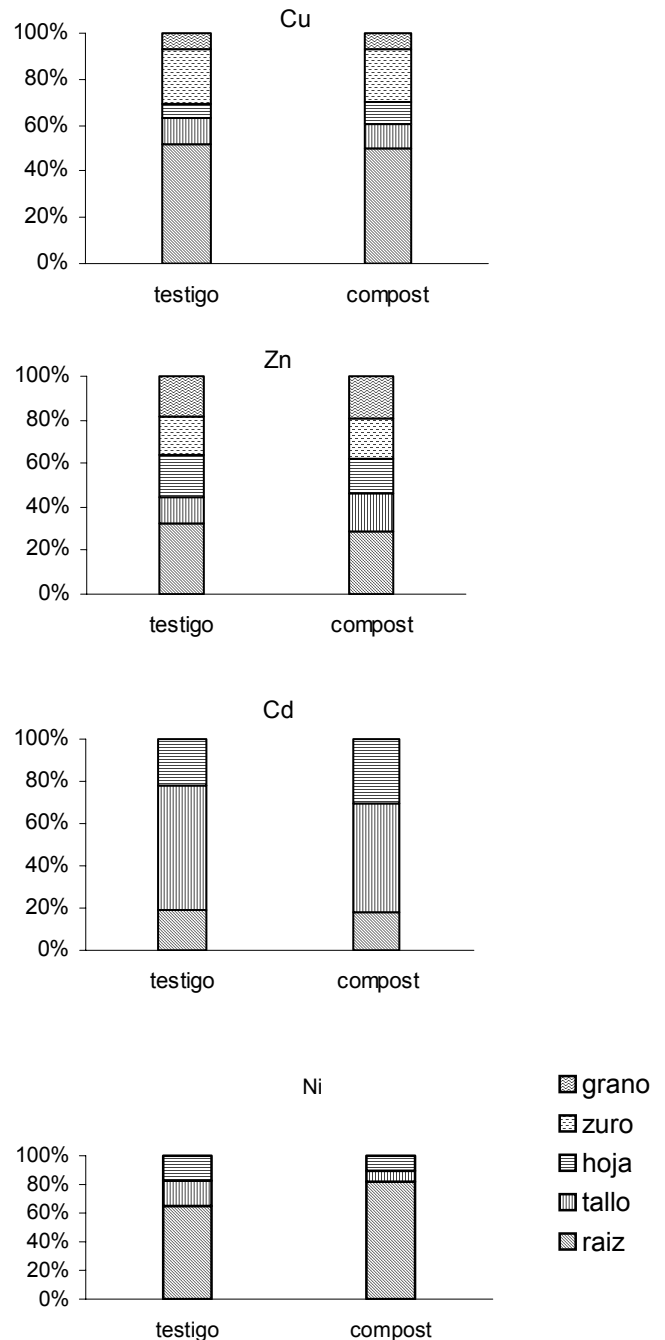
**Micronutrientes y metales pesados**

Para estudiar la distribución de los micronutrientes y metales pesados en el maíz se determinaron estos en los distintos tejidos de la planta para los diferentes tratamientos realizados en los dos años de estudio. Los valores obtenidos para el Cu se encuentran reflejados en la **tabla VII**. Las concentraciones de este elemento en los diversos tejidos analizados no presentaron diferencias significativas en los dos años de estudio entre los tratamientos. Resultados similares fueron obtenidos por Jaransch-Wehrheim *et al.* (1996) aplicando 10 y 100 Mg ha<sup>-1</sup> de compost de lodo a un suelo arenoso ácido. Macnicol y Beckertt (1985) detectaron que el nivel crítico de cobre en los tejidos de la planta de maíz es de 20 mg kg<sup>-1</sup>; valores superiores podrían presentar una reducción del 10% en la producción de grano. Los datos de Cu en el grano y en los distintos tejidos analizados en el presente estudio, se encontraron por debajo del valor crítico propuesto por estos autores. Los porcentajes de distribución de los elementos analizados con respecto a su contenido total se

**TABLA VII.** VALORES MEDIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE COBRE (mg/kg) EN LOS DISTINTOS TEJIDOS VEGETALES PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS, EN LOS DOS AÑOS DE ESTUDIO

Tejidos	Año	Tratamiento						Media compost
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
		Mg/kg						
Raíz	1	16.5	12.3	14.6	17.0	15.9	20.8	16.1
	2	9.52	9.67	10.03	9.17	10.37	9.61	9.77
Tallo	1	3.64	3.65	2.44	3.05	4.40	3.06	3.32
	2	2.40	2.40	2.40	2.42	2.39	1.79	2.32
Hojas	1	1.13	2.94	2.21	2.34	2.49	2.50	2.50
	2	1.79	2.80	3.02	2.35	2.39	2.94	2.70
Zuro	1	6.74	5.45	6.08	4.89	6.65	6.10	5.82
	2	5.37	7.15	6.62	6.45	5.29	5.45	6.19
Grano	1	1.43	1.82	2.43	2.43	1.24	1.83	1.95
	2	1.87	1.60	1.97	1.78	1.81	1.48	1.73

presentaron en la **figura 2** y también los valores medios obtenidos en los dos años de estudio. Para el caso del Cu, la raíz es el tejido vegetal que presenta la mayor concentración, mientras que su concentración en grano, en los dos años de estudio, fue el valor más bajo.



**Fig. 2.** Distribución relativa del contenido de los metales pesados absorbidos por la planta de maíz en sus diferentes tejidos. Compost: Valores medios de todos los tratamientos con compost (T2,T3,T4,T5 y T6) valores medios de los dos años de estudio. Testigo: fertilización mineral (T1)

La concentración de Zn en las distintas partes de la planta (**Tabla VIII**) no presentó diferencias significativas. Se puede observar que los contenidos de este elemento en grano en los tratamientos con compost, para el segundo año, son superiores a los obtenidos en el primer año; esto podría deberse a que durante el segundo año ha habido una mayor mineralización de la materia orgánica del compost liberando este micronutriente de forma asimilable. Los valores logrados se encuentran muy por debajo de los valores considerados como tóxicos para algunas plantas comestibles, que varían de 29 a 95 mg kg<sup>-1</sup> (Lübben *et al.* 1991). Las concentraciones encontradas en el presente estudio, para este elemento en grano, fueron de 21.3 a 45 mg kg<sup>-1</sup>. Valores similares fueron obtenidos por Bidwell y Dowdy (1987) en un estudio de maíz de tres años con varias dosis de lodo de depuradora. La distribución de este elemento en la planta, en los dos años de estudio, es bastante uniforme en todos los tejidos analizados (**Fig. 2**), comportamiento similar fue encontrado por Mench *et al.* (1994).

**TABLA VIII.** VALORES MEDIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE CINC (g/kg) EN LOS DISTINTOS TEJIDOS VEGETALES PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS, EN LOS DOS AÑOS DE ESTUDIO

Tejidos	Año	Tratamiento						Media compost
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Raíz	1	50.6	39.3	42.1	53.3	47.0	55.6	47.5
	2	40.6	36.3	34.3	40.9	42.7	45.4	39.9
Tallo	1	17.6	27.4	24.5	21.6	24.7	21.4	23.9
	2	18.2	25.8	27.1	27.8	35.4	25.0	28.4
Hojas	1	28.1	20.9	24.3	34.2	31.0	20.4	26.2
	2	26.4	21.6	32.1	24.2	20.9	27.8	25.3
Zuro	1	33.1	30.9	26.5	27.4	30.9	28.7	28.9
	2	28.1	29.7	25.2	24.8	25.8	28.6	26.8
Grano	1	26.7	29.8	22.5	21.3	25.3	23.2	24.4
	2	24.7	31.6	37.1	26.0	45.0	27.1	33.4

Los rangos obtenidos para estos dos microelementos fueron similares a los encontrados por Hormann *et al.* (1995) para un cultivo de maíz forrajero enmendado con diferentes dosis de lodo residual estabilizado con cal, en un ensayo de 10 años de duración. Los valores alcanzados para ambos elementos fueron muy inferiores a los niveles máximos medios tolerados por el ganado (100 a 300 mg kg<sup>-1</sup> y 500 a 1000 mg kg<sup>-1</sup> sobre materia seca para Cu y Zn, respectivamente) según Madejón *et al.* (2001).

Los valores de cadmio (**Tabla IX**) en los diversos tejidos vegetales, según los tratamientos, no presentaron diferencias significativas, en los dos años. Se observó que, tanto en grano como en zuro, la concentración de este elemento fue menor que el límite de detección del aparato utilizado para su determinación (0.08 mg kg<sup>-1</sup>)

**TABLA IX.** VALORES MEDIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE CADMIO (mg/kg) EN LOS DISTINTOS TEJIDOS VEGETALES PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS EN LOS DOS AÑOS DE ESTUDIO

Tejidos	Año	Tratamiento						Media compost
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Raíz	1	0.43	0.45	0.44	0.42	0.44	0.44	0.43
	2	0.30	0.29	0.60	0.21	0.60	0.60	0.46
Tallo	1	1.22	1.22	1.61	1.60	1.23	1.23	1.38
	2	1.18	1.61	1.21	1.80	1.20	1.20	1.40
Hojas	1	0.61	0.82	0.84	1.43	1.21	0.82	1.02
	2	0.58	0.60	0.80	0.65	0.61	0.58	0.64
Zuro	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Grano	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

nd: no detectado

en todos los tratamientos. La concentración de Cd en las diferentes partes de la planta fue, en orden decreciente: tallo, hojas y raíz, lo que indica la gran movilidad de este elemento en la planta (**Fig. 2**). Estos datos difirieron con los obtenidos por Gigliotti *et al.* (1996) quienes no detectaron Cd en ningún tejido vegetal de la planta de maíz cultivado con compost de lodo en un ensayo de larga duración en un suelo calcáreo. El valor crítico de la concentración de Cd en hojas de maíz es, según Macnicol y Beckett (1985), de 5 a 20 mg kg<sup>-1</sup>, valor bastante alejado del obtenido en el presente estudio.

En la **tabla X** se encuentran los valores para Ni; en ella se observa, que no hubo translocación del metal desde la raíz hacia grano, a pesar de su relativa movilidad. Este elemento no fue detectado ni en grano ni en zuro, en ninguno de los tratamientos aplicados (valor inferior al

**TABLA X.** VALORES MEDIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE NÍQUEL (mg/kg) EN LOS DISTINTOS TEJIDOS VEGETALES PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS, EN LOS DOS AÑOS DE ESTUDIO

Tejidos	Año	Tratamiento						Media compost
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
Raíz	1	2.70	7.36	7.93	8.48	7.37	0.79	7.59
	2	2.40	6.24	4.08	4.90	5.48	4.81	5.10
Tallo	1	0.60	0.60	0.58	0.60	0.61	0.60	0.60
	2	0.78	0.75	0.79	0.62	0.62	0.61	0.68
Hojas	1	0.61	0.81	0.81	0.81	0.61	0.83	0.77
	2	0.80	0.85	0.92	0.78	0.90	0.91	0.87
Zuro	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Grano	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

nd: no detectado



límite de detección,  $0.10 \text{ mg kg}^{-1}$ ). La mayor concentración de este metal, como puede verse en la **figura 1**, se encontró en las raíces, siguiendo en orden decreciente hojas y tallo. Los valores alcanzados en hoja y tallo no superan la concentración crítica para plantas cultivadas propuesta por Förstner (1995).

Las concentraciones de plomo y cromo analizadas en los diferentes tejidos vegetales y en todos los tratamientos para los dos años de estudio fueron menores al límite de detección, a excepción de los valores obtenidos en las raíces en ambos elementos. Los valores medios de los dos años de las concentraciones en las raíces para Cr fueron  $2.39$  y  $3.38 \text{ mg kg}^{-1}$  y para Pb  $6.55$  y  $6.74 \text{ mg kg}^{-1}$  para el testigo y la media de los tratamientos con compost, respectivamente. Estos datos fueron similares a los encontrados por Gigliotti *et al.* (1999), que determinaron el porcentaje de la distribución de estos elementos con respecto a la planta total y hallaron que el 100 % de estos quedaban retenidos en las raíces. La baja movilidad de estos dos elementos fue la principal causa de que se retuvieran, en su totalidad, en las raíces.

## CONCLUSIONES

Las concentraciones de metales pesados asimilables a lo largo del perfil del suelo no presentaron en ningún caso diferencias significativas entre los tratamientos con compost de lodo frente al tratamiento con fertilizante mineral, ni con los valores obtenidos en el suelo antes de iniciar la experiencia (año 0). A pesar del riego aplicado no se observaron lixiviaciones de estos elementos a lo largo del perfil en los dos años de estudio.

La producción de materia seca, en las distintas partes de la planta de maíz, obtenida con la aplicación de compost no fue significativamente diferente entre los diversos tratamientos aplicados y fue semejante a la obtenida en las parcelas con fertilización inorgánica tradicional. La producción de grano encontrada está dentro de los rangos normales para esa variedad de maíz y fue similar a la que lograron los agricultores de la zona.

En los dos años de estudio, los macro y micronutrientes encontrados en los diferentes tejidos de la planta de maíz estuvieron dentro de los límites normales para el buen desarrollo del cultivo. Los ligeros aumentos registrados en el segundo año tanto en el Cu como en el Zn no fueron significativamente diferentes a los obtenidos con la fertilización mineral tradicional.

Con respecto a los metales pesados analizados se puede decir que estos no presentan ningún problema. En el caso del Ni y del Cd los valores hallados en tallo y hoja se encontraron lejos de los valores considerados críticos y en el caso del Pb y del Cr, el 100 % de estos elementos quedaron retenidos en las raíces y no pasaron a la parte aérea de la planta.

Se puede concluir que, en nuestras condiciones experimentales, la aplicación de compost de lodo residual puede sustituir a la fertilización mineral tradicional utilizada para el cultivo de maíz de forraje sin manifestar efectos adversos en la calidad del cultivo ni en el ambiente.

## REFERENCIAS

- Bidwell A.M. y Bowdy R.M. (1987). Cadmium and zinc availability to corn following termination of sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.* 16, 438-442.
- Costa F., Hernández M.T. y Moreno J.I. (1987). Factores limitantes de la utilización agrícola de los lodos residuales. En : *Utilización agrícola de los lodos de depuradora*. CSIC. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Murcia, España. pp 41-60.
- Dowdy R.H. (1995). Effects of sewage sludge on corn silage and animal products. *Station Bulletin 606*, pp. 69-73. Minnesota Agricultural Experiment Station, EUA.
- Dumitru M., Motelica D. M., Alexandrescu A., Plaxienco D., Gament E., Dumitru I. y Vranceanu N. (1997). Agricultural use of sewage sludge. *Publicati- Societatii nationale Romane pentru Stiinta Solului*. 29 b 221-240.
- Förstner U. (1995). Metal speciation and contamination of soil. En: *Land contamination by metals: global scope and magnitude of problem*. (H.E. Allen, C.P. Huang, G.W. Bailey y A.R. Bowers, Eds.). Boca Raton, pp. 1-33.
- Fuller M.R., Parkinson S. J., Vantarakis G. y Groenhof A.C.. (1996). An assessment of the agronomic value of cocomposted MSW and sewage sludge. En: *The Science of composting*. European Commission International Symposium (de Bertoldi M. *et al.* Eds.). Bologna. pp. 1166-1169.
- Gigliotti G; Businelli D. y Guisquiani P. (1999). Compostion changes of soil humus after massive applications of urban waste compost: a comparison between FT-IR spectroscopy and humification parameters. *Nutr. Cycl. Agroec.* 55, 23-28.
- Hill S.J., Pallanca J., Trier C. y Jury S. (1996). A study of the uptake of heavy metals by fodder maize grown with municipal solid waste/sewage sludge derived compost. *Toxicol. Environ. Chem.* 55, 215-233.
- Hormann C.M., Clapp C.E., Dowdy R.H., Larson W.E., Duncomb D.R., Halbach T.R. y Polta R.C. (1995). The effect of lime-cake municipal sewage sludge on corn yield, nutrient uptake and soil analyses. En: *Agricultural utilization of Sewage Sludge*. Minnesota Agricultural Experiment Station. *Station Bulletin 606*, pp. 74-79.
- Jaraus-Wehrheim B., Mocquot M. y Mench M. (1996). Uptake and partitioning of sludge borne copper in field-grown maize (*Zea mays* L.). *Euro. J. Agron.* 5, 259-271.
- Logan T.J., Lindsay B.J., Goins L.E. y Ryan J.A. (1997). Field Assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludge rate response. *J. Environ. Qual.* 26, 534-550.

- Lindsay W. y Norvell W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 421-428.
- Lübben S., Rietz E. y Sauerbeck D. (1991). Metal uptake and crop growth on sewage sludge field trials with heavy metal contents near the recommended limit values. En *Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes*. Elsevier, Londres, pp. 535-543.
- MAPA (1994). Métodos Oficiales de Análisis. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid, España. Tomo III. pp. 221-324.
- Macnicol R.D. y Beckett P.H.T. (1985). Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Plant Soil* 85, 107-129.
- Madejón P., Murillo L.M., Marañón T., Cabrera F. y López R. (2001). Elementos traza en gramíneas afectadas por el vertido tóxico de las minas de Aznalcóllar. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 16, 429-446.
- Mc Bride M.B. (1995). Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? *J. Environ Qual.* 24, 5-18.
- Mench M.J., Martín E. y Solda P. (1994). After effects of metals derived from a highly metal-polluted sludge on maize (*Zea mays* L.). *Water, Air Soil Pollut.* 75, 277-291.
- Parkinson R.J., Fuller M.P. y Groenhof A.C. (1999). An evaluation of greenwaste compost for the production of forage maize (*Zea mays* L.). *Compost Sci. Utilizat.* 7, 72-80.
- Snyman H.G., Jong de J.M. y Aveling T.A.S. (1998) The stabilization of sewage sludge applied to agricultural land and the effects on maize seedlings. *Wat. Sci. Tech.* 38, 87-95.
- SSS Soil Survey Staff (1998). *Keys to Soil Taxonomy*. USDA NRCS, Washington, D.C. 326 p.
- USDA. (1954). *Suelos salinos sódicos*. Agriculture Handbook nº 60, United States Department of Agriculture.
- Walter I., Miralles de Imperial R., Funes E. y Bigeriego M. (1989). Caracterización de los lodos residuales de las estaciones depuradoras del Plan de Saneamiento Integral de Madrid (PSIM). *Invest. Agr. Produc. Protec. Veg.* 4, 377-392.
- Walter I. y Cuevas G. (1999). Chemical fractionation of heavy metals in a soil amended with repeated sewage sludge application. *Sci. Total Environ.* 226, 113-119.

