

APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES, ESTIÉRCOL BOVINO Y FERTILIZANTE QUÍMICO EN EL CULTIVO DE SORGO FORRAJERO (*Sorghum vulgare* Pers.)

José María HERNÁNDEZ-HERRERA¹, Emilio OLIVARES-SÁENZ²,
Ignacio VILLANUEVA-FIERRO³, Humberto RODRÍGUEZ-FUENTES²,
Rigoberto VÁZQUEZ-ALVARADO², Juan Francisco PISSANI-ZÚÑIGA²

¹Instituto Tecnológico Agropecuario No. 1, Villa Montemorelos, Durango, México

²Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, N.L., México

³CIIDIR-IPN Unidad Durango, Calle Sigma S/N, Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo., México, C. P. 34220, Becario COFAA, ifierro62@yahoo.com

(Recibido abril 2004, aceptado noviembre 2004)

Palabras clave: sorgo forrajero, metales pesados, lodo residual, fertilizante químico, absorción de metales

RESUMEN

En este estudio se aplicó lodo residual, fertilizante químico y estiércol de bovino en un suelo típico del suroeste de la ciudad de Durango, México, para estimar y comparar la posible mejora en la producción de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare* Pers.). Se cuantificó la concentración de metales pesados en la parte aérea de la planta y en su raíz, para estimar si la planta los absorbe, ya que éstos no pueden degradarse en el suelo. El lodo residual proviene de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Durango y no es impactada por la industria ya que sólo se tratan aguas residuales domésticas. Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones y la comparación de medias por el método de Tukey. Los resultados indican que la producción de materia seca vegetal es mayor en los tratamientos que utilizan lodos residuales y estiércol bovino y que la producción vegetal es menor en los tratamientos con fertilizante químico y el testigo.

Key words: sorghum foliage, heavy metals, wastewater sludge, chemical fertilizer, metal absorption

ABSTRACT

Wastewater sludge, chemical fertilizer, and bovine manure were applied to a typical soil from the southeast part of Durango City, Mexico, in order to estimate and to compare the potential benefits in sorghum foliage (*Sorghum vulgare* Pers.). Concentrations of heavy metals were quantified from the aerial part of the plants and their roots, to detect if the plant absorbs the metals, because they cannot be degraded in the soil. Wastewater sludge comes from the wastewater plant of Durango City, and it is not impacted by industry; only domestic wastewaters are treated. A complete randomized block experimental design with five treatments and five repetitions and comparisons among treatment means were done using Tukey's method. Results show that production of dry matter is higher using wastewater sludge and bovine manure treatments, whereas lower production is obtained for chemical fertilizer and control treatments.

INTRODUCCIÓN

En Durango, México (24° 03' latitud norte y 104° 36' longitud oeste), los factores limitantes para la producción de forrajes son la escasez de agua, el suelo erosionado y la baja fertilidad, entre otros. El Sistema de Agua Potable y Alcantarillado (SIDEAPA) de Durango, tiene una planta para tratar exclusivamente las aguas residuales domésticas y el lodo resultante de la planta tiene, a la fecha de esta investigación, aproximadamente 80 cm de alto en una profundidad de agua de 450 cm, es decir la eficiencia de la planta está disminuida en 20 %.

En el ámbito mundial se han desarrollado alternativas de uso de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo una de ellas la incorporación en suelos agrícolas, evitando así el costo de confinamiento. Esta práctica representa la oportunidad de darle un valor agregado al residuo que se está generando en la planta tratadora de aguas residuales, al aprovecharse como fertilizante y/o acondicionador de suelo. En México, cuando los lodos provienen de aguas muy contaminadas por compuestos tóxicos o metales pesados, su empleo es restringido en la agricultura, se pueden utilizar, pero deben de cumplir con los límites máximos permitidos en la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002).

Los metales pesados presentes en los lodos contaminan el suelo y son posiblemente absorbidos por los cultivos en concentraciones tales que puedan ser nocivas para la salud de quien los consume, además, se pueden integrar a la cadena trófica (Kelling *et al.* 1977, Greenberg *et al.* 1992, Bukovac *et al.* 2002), por eso es importante establecer su control en los campos de cultivo (Hue 1996). Continúa el debate sobre si el contenido patógeno (bacterias, virus y parásitos) puede ser nocivo para la salud (Lewis y Gattie 2002, Rusin *et al.* 2003), pero éste no fue el objetivo del estudio.

Una desventaja del uso de biosólidos, es que el contenido de nutrimentos esenciales para las plantas es muy variable debido a cambios de concentraciones del influente a la planta de tratamiento y a cambios en la actividad microbiológica y química de la misma. Las dosis de aplicación suelen fijarse en función de los requerimientos del cultivo en nitrógeno y fósforo, tomando en cuenta que la productividad del suelo aumenta a causa de la mineralización de la materia orgánica y la liberación de nutrimentos (Quinteiro *et al.* 1998).

La aplicación de biosólido líquido en un cultivo de chile serrano mostró un incremento del rendimiento

en el primer año, mientras que con aplicación de biosólido deshidratado el incremento fue mayor en los siguientes tres ciclos (Martínez 2003). Sin embargo, no se menciona el nivel de fertilidad natural del suelo ni la concentración de nutrimentos en el lodo que se aplicó. Al determinar el contenido de metales pesados en el suelo, después de aplicar lodos residuales, se encontró que las formas extractables de estos, presentaron una baja concentración en el suelo debido al pH alcalino, lo que originó que los metales pesados se precipitaran como hidróxidos, carbonatos, sulfatos o fosfatos. Además, la materia orgánica presente en el suelo formó complejos organometálicos que disminuyeron la absorción de los metales pesados por las raíces de las plantas (Ramos y Aguilera 1995). En la aplicación de biosólidos en condiciones controladas, se evaluó el crecimiento de tres especies de cultivos: sorgo para grano, maíz y sorgo forrajero, bajo 5 dosis de biosólido (0, 10, 20, 30 y 40 %) durante 6 meses, encontrándose que la cantidad de nitrógeno presente en el biosólido de las dosis de 20, 30 y 40 % fue suficiente para los requerimientos de las plantas y los mejores resultados fueron los tratamientos con 30 y 40 % (Háguaed *et al.* 2000).

Al utilizar en Madrid, España, biosólidos de plantas depuradoras de agua residual de origen urbano digeridos anaeróbicamente en China, aplicados a un suelo degradado, bajo un ambiente semiárido para la producción del cultivo de *Thymus zygis*, en dosis de 0 y 80 t ha⁻¹, se observó un incremento en la concentración de metales pesados a nivel superficial del suelo (0-15 cm), así como una mejora en el rendimiento del cultivo en las parcelas tratadas con respecto a las plantas testigo. La concentración de Cd, Cu y Zn en la planta fue ligeramente superior a la del cultivo testigo, pero en ningún caso se alcanzaron las concentraciones consideradas tóxicas (Illera y Cala 2001).

El objetivo de este estudio fue estimar el efecto de la aplicación de lodo residual, abono orgánico y fertilizante químico, en la producción de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare* Pers.), así como la determinación de la concentración de metales pesados en tejidos de la parte aérea y de la raíz de la planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en el Centro Interdisciplinario y de Investigación para el Desarrollo Integral de la Región (CIIDIR-IPN-Unidad Durango). El cultivo indicador fue el sorgo forrajero, que se colocó

en contenedores de polietileno (40 cm de profundidad y 20 cm de diámetro); en cada contenedor se sembraron tres semillas y a los 15 días se desahijó dejando una sola planta por contenedor. Los tratamientos fueron los siguientes: T_1 = testigo, sin aplicación, T_2 = 4 t ha⁻¹ de lodo residual, T_3 = 8 t ha⁻¹ de lodo residual, T_4 = 4 t ha⁻¹ de estiércol bovino, T_5 = fertilizante químico con la fórmula 120-60-00. Las fuentes de fertilizante químico fueron: sulfato de amonio (20.5 % N) y superfosfato de calcio triple (46 % P₂O₅), aplicando la totalidad del fósforo y la mitad del nitrógeno al momento de la siembra, la otra mitad de nitrógeno se aplicó en julio. Los lodos en forma semisólida se mezclaron con el suelo un mes antes de la siembra que se realizó de manera manual el 28 de abril de 2001, utilizando la variedad Silo Sugar. Se aplicaron riegos ligeros cada vez que la planta lo requirió. Las muestras de plantas para su análisis se colectaron cuando el grano de sorgo se encontraba en estado lechoso masoso; se tomaron muestras de la parte aérea (tallos, hoja y panícula) y de la raíz. Los lodos provenientes de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Durango fueron analizados para su caracterización fisicoquímica con base en las técnicas descritas por Rodríguez y Rodríguez (2002). Las concentraciones de los metales en las muestras de lodo y planta se determinaron mediante espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito utilizando un instrumento Perkin Elmer Modelo 2280 y un horno de grafito Perkin Elmer Modelo HGA 400, previa digestión con ácido nítrico, acorde al método 3050B de las técnicas SW-846 de la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos de América (EPA 2003). El proceso de digestión es el siguiente: se pesa un gramo de suelo o de materia vegetal seca, se vierte en un vaso de precipitados de vidrio de 250 mL de capacidad, enseguida se le adicionan 20 mL de agua desionizada y 5 mL de ácido nítrico, se tapa con un vidrio de reloj y se calienta, sin hervir la mezcla, hasta obtener una acción de reflujo. Se sigue calentando hasta que desaparezcan los vapores rojizos (óxido nítrico) y el nivel del líquido sea de alrededor de 5 mL. Se enfría y se continúan agregando porciones de agua desionizada y ácido nítrico similares a las descritas anteriormente hasta que dejen producirse vapores rojizos. Al terminarse la digestión se agregan 50 mL de agua desionizada, se filtra la mezcla digerida a través de un filtro Whatman No. 41. Se enjuagan las partículas retenidas en el filtro con una solución de ácido nítrico al 5 % v/v y el filtrado se afora a 100 mL con agua desionizada.

Los límites de detección de los metales pesados fueron: 1.4, 0.1, 0.4, 0.5, 0.4, 0.6 y 0.5 mg kg⁻¹ de suelo, para cadmio, plomo, cobre, níquel, hierro, zinc

y manganeso, respectivamente, obtenidos con el promedio de los blancos más dos veces su desviación estándar.

La unidad experimental fue un contenedor, no hubo control de temperatura, las plantas crecieron a cielo abierto. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con 5 tratamientos y 5 repeticiones. Se utilizó el método de Tukey para comparar las medias de cinco muestras (Olivares 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el **cuadro I** se muestran los resultados del análisis del suelo y de los lodos. El suelo utilizado fue un Solonetz gléico, con las características siguientes: textura arcillosa, bajo contenido de materia orgánica (1.1 %), baja infiltración (4 cm h⁻¹), rico en carbonatos de calcio y pH de 8.61. El lodo residual obtenido de la planta de tratamiento es un suelo migajón-arenoso, con pH de 7.1, 1.14 % de nitrógeno total, 286 ppm de fósforo y un contenido de 1.14 % de materia orgánica, que pueden beneficiar las características fisicoquímicas del suelo usado. De manera sobresaliente, se observa un gran contenido de arena en el lodo residual. Las características de los suelos de Durango en cuanto al pH, aseguran que los metales pesados que se apliquen pueden salir de la solución del suelo vía precipitación formando compuestos in-

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL SUELO UTILIZADO Y DEL LODO RESIDUAL (BASE SECA)

Parámetro (unidades)	Suelo	Lodo
Arena (%)	30.5	63.5
Arcilla (%)	42.2	1.8
Limo (%)	27.3	34.7
Tipo de textura	arcillosa	migajón arenosa
pH (unidades pH)	8.6 (1:2 agua)	7.1 (1:2 agua)
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.04	0.996
Nitrógeno total (%)	0.06	1.14
Fósforo (ppm)	7.8	286
Potasio intercambiable (ppm)	870	460
Materia orgánica (%)	1.1	17.8
Sodio intercambiable (ppm)	33	315
Calcio intercambiable (ppm)	6200	
Magnesio intercambiable (ppm)	420	
Conductividad (dS m ⁻¹)	1.138	3.08
Calcio (meq L ⁻¹)	1.2	18
Magnesio (meq L ⁻¹)	4	0
Sodio (meq L ⁻¹)	6	13.7
Carbonatos (meq L ⁻¹)	0	0
Bicarbonatos (meq L ⁻¹)	9.2	18.7
Cloruros (meq L ⁻¹)	2.5	7.6

solubles, evitando así la contaminación de los tejidos vegetales y la posterior inclusión de estos metales en la cadena alimenticia.

La comparación entre la concentración de metales pesados obtenida en los lodos residuales analizados en este estudio con las de la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, se presenta en el **cuadro II**. Se observa que la concentración promedio de los metales pesados analizados en el lodo residual está muy por debajo del límite permitido por la norma.

CUADRO II. CONCENTRACIÓN MÁXIMA (mg kg⁻¹) DE METALES PESADOS PERMITIDA POR LA NOM-004-SEMARNAT-2002 Y CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE METALES EN Lodos RESIDUALES (BASE SECA)

Metales	Norma*	Lodos residuales
Cadmio	85	3.6
Plomo	840	149
Cobre	4300	142
Níquel	420	< 0.5**
Hierro	-	1843
Zinc	7500	1360
Manganeso	-	179

* NOM-004-SEMARNAT-2002.

** La concentración fue menor al límite de detección

La concentración promedio en base seca de los metales pesados en el tejido vegetal, parte aérea del sorgo forrajero, para cada uno de los tratamientos se muestra en el **cuadro III**. Las concentraciones de Cu, Fe, Zn y Mn, se encuentran en niveles nutri-

CUADRO III. CONCENTRACIÓN PROMEDIO (mg kg⁻¹) DE METALES PESADOS (BASE SECA), EN LA PARTE AÉREA (HOJAS, TALLOS Y PANÍCULAS) DE SORGO FORRAJERO, PARA LOS TRATAMIENTOS T₁ A T₅*

Metal	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Cd	N.D.**	0.8	0.56	0.42	0.21
Pb	4.2	6.2	8.9	8.4	< N.D.**
Cu	0.6	1.4	2.1	2.4	1.3
Ni	6.4	1.7	4.4	8.3	22.2
Fe	211.3	124.1	41.3	55.8	52.9
Zn	26.3	30.4	27.7	28.3	19.7
Mn	56.2	53.6	51.0	38.1	46.8

* T₁ = testigo, sin aplicación, T₂ = 4 t ha⁻¹ de lodo residual, T₃ = 8 t ha⁻¹ de lodo residual, T₄ = 4 t ha⁻¹ de estiércol bovino, T₅ = fertilizante químico 120-60-00

*N.D. = no determinado

cionales adecuados (Reuter y Robinson 1986), por lo que no representan problemas de toxicidad para la planta.

En el **cuadro IV** se muestra la concentración de metales pesados en base seca de la raíz de las plantas de sorgo para cada uno de los tratamientos. Las concentraciones de Cu, Fe, Zn y Mn, se encuentran en niveles nutricionales adecuados (Reuter y Robinson 1986), por lo que no representan problemas de toxicidad para la planta. En la raíz se tiene alrededor de 100 veces más hierro (Fe) que en el tallo para cada uno de los tratamientos. En general, la concentración de metales fue mayor en la raíz que en el tallo.

CUADRO IV. CONCENTRACION PROMEDIO (mg kg⁻¹) DE METALES PESADOS (BASE SECA), EN LA RAÍZ DE SORGO FORRAJERO, PARA LOS TRATAMIENTOS T₁ A T₅*

Metal	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Cd	0.3	0.2	0.2	0.5	0.5
Pb	8.3	5.1	12.4	6.2	6.5
Cu	3.0	3.3	3.2	4.1	2.8
Ni	2.8	1.6	3.9	6.5	10.7
Fe	4290	3460	3415	5881	4555
Zn	24.5	26.6	26.3	34.8	25.1
Mn	135	135	121	180	151

* T₁ = testigo, sin aplicación, T₂ = 4 t ha⁻¹ de lodo residual, T₃ = 8 t ha⁻¹ de lodo residual, T₄ = 4 t ha⁻¹ de estiércol bovino, T₅ = fertilizante químico 120-60-00 (N-P-K)

Para ver si hubo diferencias significativas entre cada tratamiento se utilizó el análisis de varianza. En el **cuadro V** se muestra dicho análisis para la producción de sorgo forrajero en gramos por planta (base seca), en donde se observa que hay una diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$), es decir,

CUADRO V. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA PRODUCCIÓN DE SORGO FORRAJERO

F.V.	G.L.	C.M.	F
Tratamientos	4	622.5	15.9*
Bloques	4	75.8	1.9 ^{N.S}
Error	16	39.1	
Total	24		

* = Significativa a $p \leq 0.05$. N.S. = Diferencia no significativa. C. V. = 19.74 %. F.V. = Fuente de variación, G.L. = grados de libertad, C.M. = cuadrados medios

los resultados obtenidos son diferentes entre sí. En los bloques no hubo diferencia significativa. El coeficiente de varianza (C.V.) de 19.74 % indica un control relativamente bajo en el proceso. Al efectuar una comparación de medias de la producción de forraje (gramos promedio de planta obtenida, base seca) en cada tratamiento, por el método de Tukey (**Cuadro VI**), se observa que los tratamientos T_2 , T_3 y T_4 , manifiestan un comportamiento estadísticamente similar, con rendimientos de materia seca superiores a los tratamientos T_1 y T_5 . Estos últimos tratamientos son similares entre sí.

CUADRO VI. COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN PROMEDIO DE FORRAJE EN CADA TRATAMIENTO POR EL MÉTODO TUKEY

Tratamiento	Producción* (g/planta)
T_2	41.4 a
T_3	43.6 a
T_4	32.2 ab
T_1	23.4 bc
T_5	17.8 c

* Los tratamientos con la misma literal son similares.

T_1 = testigo, sin aplicación, T_2 = 4 t ha⁻¹ de lodo residual, T_3 = 8 t ha⁻¹ de lodo residual, T_4 = 4 t ha⁻¹ de estiércol bovino, T_5 = fertilizante químico 120-60-00 (N-P-K)

CONCLUSIONES

Los tratamientos aplicados con los abonos orgánicos de biosólidos y estiércol bovino, mostraron la mayor producción de forraje en base seca, en comparación con los tratamientos con fertilizante químico y sin fertilizante. La adición de abonos orgánicos o químicos, no influyó apreciablemente en el contenido de metales pesados en la parte aérea y en la raíz del cultivo.

La concentración de metales pesados en los lodos residuales estuvo por debajo de los límites que establece la Norma (NOM-004-SEMARNAT-2002), lo que indica que la aplicación de estos tratamientos no presenta riesgos de toxicidad para los cultivos, al menos en ciudades como Durango, donde las aguas residuales no provienen de la industria, por lo que se recomienda la utilización de éstos para incrementar la producción de sorgo para consumo animal. La aplicación continua y prolongada de biosólidos al suelo de cultivo podría cambiar los resultados obtenidos.

Se recomienda efectuar una depuración de lodos de la planta de tratamiento de aguas para incrementar la eficiencia de trabajo e instalar un tratamiento primario (sedimentación) para evitar que se dañen los sellos de las bombas de transferencia con la arena bombeada a la planta.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango y al Programa (PAICyT) Programa de Apoyo a la Investigación de Ciencia y Tecnología (Proyecto No. CN-475-01) por el financiamiento del presente proyecto.

REFERENCIAS

- Bukovac M., Flores J. y Backer E. (2002). Peach leaf surfaces. Changes in wettability, retention, cuticular permeability and epicuticular wax chemistry during expansion with special reference to spray application. J. Am. Soc. Hort. Sci. 104, 611-617.
- EPA (2003). Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods: www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/under.htm. Consultado en febrero de 2004.
- Greenberg A.E., Clesceri L.S. y Eaton A.W. (1992). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 18a edición, American Public Health Association 3-1, 3-28.
- Hágua M.L., Foroughbakhch R.R. y Hernández M. (2000). Comportamiento de especies vegetales utilizando residuos generados en una planta tratadora de aguas residuales en Nuevo León, México, para su posible incorporación en prácticas agrícolas; investigación para el desarrollo regional; COFUPRO, SEP-CONACyT, FIRA. México, D.F., p. 145-155.
- Hue N.V. (1996). Land application of biosolids. www.sludg.htm. agrss.Sherman.Hawaii. edu; University of Hawaii. Consultado en febrero de 2003.
- Kelling K.A., Keeney D.R., Walsh L.M. y Ryan J.A. (1977). A field study of agricultural use of sewage sludge: effect on uptake and extractability of sludge-borne metals. J. Environ. Qual. 6, 352-358.
- Illera V.I. y Cala V. (2001). Niveles de metales pesados en *Thymus zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. Rev. Int. Contam. Ambient. 17, 179-186.
- Lewis D.L. y Gattie D.K. (2002). Pathogen risks from applying sewage sludge to land. Environ. Sci. Technol. 36, 285A-293A.

- Martínez de la Cerda J. (2003). Efecto del lodo residual en el rendimiento y concentración de metales pesados en hortalizas y granos básicos. Tesis doctoral, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, N. L., pp. 43-123.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002). Protección ambiental para lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., pp. 18-60.
- Olivares S.E. (1994). *Paquete de diseños experimentales*. Versión 2.5. Facultad de Agronomía; UANL. Marín, N. L.
- Quinteiro R.M.P., Andrade C. M. L. y De Blas V. E. (1998). Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: experiencias de campo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. Edafología No. 5. Universidad de Vigo, España. pp. 1-10.
- Ramos B.R. y Aguilera H.N. (1995). Contaminación por metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luis Tlaxiátemalco, Tlahuac y Mixquic, D.F. La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamps. Méx. 32 p.
- Reuter D.J. y Robinson J.B. (1986). *Plant analysis and interpretation manual*. Intaka Press, National Library of Australia. Melbourne, Sydney, Australia, pp. 178-180.
- Rodríguez F.H. y Rodríguez A.J. (2002). *Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación*. Trillas, México, D. F., pp. 13-150.
- Rusin P.A., Maxwell S.L., Brooks J.P., Gerba C.P. y Pepper I.L. (2003). Evidence for the absence of *Staphylococcus aureus* in land applied biosolids. Environ. Sci. Technol. 37, 4027-4030.