

EFFECTO DE LOS BIOSÓLIDOS SOBRE LA HUMEDAD Y LOS NUTRIMENTOS DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE EN PASTIZALES SEMIÁRIDOS

Effect of Biosolids on Soil Moisture, Nutrients and Forage Yield in a Semiarid Rangeland

Pedro Jurado^{1‡}, Tulio Arredondo², Ernesto Flores³, Victor Olalde⁴ y Juan Frías⁵

RESUMEN

Los suelos de los pastizales semiáridos de México presentan bajos niveles de nutrientes, lo cual afecta su productividad. Los biosólidos, un subproducto del tratamiento de aguas, tienen alto potencial para utilizarse como fertilizantes o mejoradores de suelo. Se aplicaron biosólidos en forma superficial en parcelas de 1 m², en un pastizal semiárido, en junio de 2002, en dosis de 0 (testigo) 15, 30, 45, 60, 75 y 90 Mg en base seca ha⁻¹. Se midieron la humedad volumétrica (HVS), durante el verano de 2002, y algunos nutrientes del suelo, en agosto y noviembre de 2002 y julio de 2003. Se determinó la producción de forraje en 2002 y 2003. La HVS fue mayor con 45 a 90 Mg ha⁻¹ que en el testigo en todas las fechas, excepto el 2 y el 13 de agosto. El valor más alto de HVS se observó el 19 de julio, con 30 ± 2% con 75 Mg ha⁻¹ y 18.7 ± 1% en el testigo. Los biosólidos no afectaron los contenidos de materia orgánica y potasio del suelo. Sin embargo, el pH del suelo disminuyó de 6.3 ± 0.1, en el testigo, a 5.3 ± 0.02, con 90 Mg ha⁻¹, en noviembre 2002. Los tratamientos incrementaron la disponibilidad de N (de 7 ± 1 mg kg⁻¹ en el testigo, hasta 169 ± 15 mg kg⁻¹ con 90 Mg ha⁻¹, en agosto de 2002) y de P en el suelo (de 5 ± 0.6 en el testigo hasta 55 ± 6 mg kg⁻¹ con 75 Mg ha⁻¹, en agosto de 2002). La producción de forraje de zacates se incrementó hasta

550% con 60 Mg ha⁻¹, en 2002, y hasta en 650% con 90 Mg ha⁻¹, en 2003. Los biosólidos pueden utilizarse para incrementar los nutrientes del suelo y la producción forrajera de los pastizales semiáridos en México.

Palabras clave: zacates, rendimiento de pastizales, fertilidad del suelo, agua del suelo.

SUMMARY

Soils of semiarid rangelands in Mexico show low nutrient concentrations which affect forage productivity. Biosolids, a byproduct of wastewater treatment, have a high potential to be used as fertilizer or soil conditioner. In June 2002, biosolids were surface-applied in 1 m² field plots of a semiarid rangeland at 0 (control), 15, 30, 45, 60, 75 or 90 Mg ha⁻¹ of dry matter. Volumetric soil moisture was estimated during the growing season in 2002 and soil nutrients in August and November 2002, and July 2003. Forage production was estimated in 2002 and 2003. Soil moisture was higher with application of biosolids at 45 to 90 Mg ha⁻¹ on all dates except on August 2 and 13. The highest soil moisture was observed on July 19 with 30 ± 2% at 75 Mg ha⁻¹, compared with 18.7 ± 1% in control. Application of biosolids did not affect soil organic matter and soil K. Soil pH decreased from 6.3 ± 0.1 in the control to 5.3 ± 0.02 with 90 Mg ha⁻¹ in November 2002. Biosolids increased soil N (7 ± 1 mg kg⁻¹ in the control to 169 ± 15 with 90 Mg ha⁻¹) and soil P (5 ± 0.6 mg kg⁻¹ in control to 55 ± 6 mg kg⁻¹ with 75 Mg ha⁻¹) in August 2002. Grass forage production increased 550% with 60 Mg ha⁻¹ in 2002 and 650% with 90 Mg ha⁻¹ in 2003. Biosolids can be used to increase soil nutrients and forage yield of semiarid rangelands in Mexico.

Index words: grasses, rangeland forage yield, soil fertility, soil water.

¹ Campo Exp. La Campana-INIFAP. Ave Homero 3744, 31100 Chihuahua, Chih., México.

[‡] Autor responsable (jurado.pedro@inifap.gob.mx)

² Departamento de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales-Instituto Potosino de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. San Luis Potosí, S. L. P., México.

³ Centro de Ciencias Agropecuarias-Universidad Autónoma de Aguascalientes. Jesús María, Aguascalientes, México.

⁴ CINESTAV-IPN-Unidad Irapuato. Irapuato, Guanajuato, México.

⁵ Instituto de Ciencias Agrícolas-Universidad de Guanajuato. Irapuato, Guanajuato, México.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de biosólidos en la agricultura es una práctica recomendable para reutilizar los nutrientes y la materia orgánica presentes en este subproducto de las plantas de tratamiento de aguas residuales [United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1989; Outwater, 1994; Figueroa *et al.*, 2002]. Aproximadamente 50% de los biosólidos se reutilizan en la agricultura en Estados Unidos (USEPA, 1999) y en la Comunidad Europea (Van den Berg, 1993).

En México, la generación de biosólidos es de aproximadamente 650 000 Mg año⁻¹ en base seca (Barrios *et al.*, 2001), mientras que en Estados Unidos alcanza 6.3 millones de Mg año⁻¹ en base seca (USEPA, 1999). La Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002) contiene los lineamientos para el manejo y la disposición final de lodos orgánicos y biosólidos, en México, con el fin de proteger el medio ambiente y la salud humana [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2003]. De acuerdo con dicha norma, pueden tener un uso forestal, como mejoradores de suelo y en suelos agrícolas, siempre y cuando pertenezcan al menos al tipo "Bueno" y a la clase "C".

Algunos estudios en México reportan efectos positivos sobre la fertilidad del suelo y sobre la producción de algunos cultivos, como haba (*Vicia faba*) y coliflor (*Brassica oleracea* var. *Botrytis*), con el uso de biosólidos (Martin del Campo *et al.*, 2001; Martínez *et al.*, 2001). Uribe *et al.* (2003), en Chihuahua, reportan efectos benéficos sobre la producción de maíz forrajero (*Zea mays*) con la aplicación de 10.9 Mg ha⁻¹ de biosólidos incorporados al suelo.

Los efectos de la aplicación de biosólidos en pastizales áridos y semiáridos se estudiaron en Estados Unidos (Fresquez *et al.*, 1990; Benton y Wester, 1998; Jurado y Wester, 2001). De dichos trabajos se concluye que los biosólidos aplicados superficialmente en pastizales nativos muestran efectos positivos, como incrementos en la producción y la calidad de forraje de zacates (Jurado *et al.*, 2004), y negativos, como una ligera pérdida de biodiversidad de plantas (Fresquez *et al.*, 1990). Se ha documentado la baja productividad y fertilidad del suelo de los pastizales semiáridos en México (SARH, 1982; Arredondo, 1984; Aguado *et al.*, 1989; Jurado y Negrete, 1990). En México, no existe información sobre el uso de biosólidos en pastizales, por

lo tanto, este trabajo se realizó con el objetivo de evaluar los cambios en la humedad y algunos nutrientes del suelo y el rendimiento de forraje de zacates nativos en respuesta a la aplicación superficial de biosólidos (BIO-SUP) en un pastizal semiárido.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental Vaquerías, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en el km 8 de la carretera Ojuelos-Lagos de Moreno, en el municipio de Ojuelos, Jalisco, con 21.77927° N y 101.61133° O, a una altitud de 2150 m. El clima es de tipo semitropical árido templado (Medina *et al.*, 1998), con una temperatura media anual de 17 °C y una precipitación media anual de 425 mm. La topografía es de plana hasta una pendiente menor de 3%, con suelo Calcisol háplico (FAO-ISSS-ISRIC, 1998), de origen aluvial, textura media (franco-arenoso con 58.4% arena, 14.6% arcilla, 27% limo) y con una fase dúrica (tepetate) a una profundidad entre 50 y 100 cm. El tipo de vegetación es un pastizal mediano abierto de *Bouteloua-Lycurus* con invasión de huizache (*Acacia schaffneri*) y nopal (*Opuntia* spp.) [Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA), 1979].

Con base en su producción homogénea de gramíneas (promedio de 843 ± 101 kg materia seca ha⁻¹) y una distancia de al menos 1 m entre parcelas (Jackson y Caldwell, 1993), bajo un patrón irregular, se seleccionaron 35 parcelas experimentales de 1 m x 1 m, dentro de una superficie aproximada de 1 ha de pastizal nativo en condición regular. Las parcelas se delimitaron con bordes de madera de 10 cm de altura, para evitar la dispersión de biosólidos. Éstos se obtuvieron de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Aguascalientes, Aguascalientes; se les midió el contenido de humedad, por gravimetría, y se aplicaron en siete niveles: 0 (testigo), 15, 30, 45, 60, 75 y 90 Mg ha⁻¹ en base seca con cinco repeticiones. Cuatro muestras de biosólidos de aproximadamente 1 kg se colectaron y congelaron para su análisis químico (Cuadro 1).

Los biosólidos se aplicaron superficialmente y se distribuyeron de manera uniforme en las parcelas, al inicio del periodo de lluvias (13 de junio de 2002). Las parcelas estuvieron bajo temporal y se excluyeron al pastoreo por ganado y lagomorfos, por medio de cerco

Cuadro 1. Composición química de biosólidos aeróbicos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Aguascalientes, 2002 (n = 4).

Variable	Promedio	Variable	Promedio
	%		mg kg ⁻¹
pH (agua 1:5)	6.6	Zinc	972
CE [†] (agua 1:5), dS m ⁻¹	1.5	Boro	2
Materia orgánica	35.2	Hierro	8564
Nitrógeno	4.1	Cobre	272
Fósforo	3.4	Plomo	38
Potasio	0.1	Arsénico	11
Calcio	2.7	Cromo	60
Magnesio	0.3	Cadmio	6
Azufre	1	Manganeso	153
Aluminio	1	Cloro	832

[†] Conductividad eléctrica. Métodos de análisis: pH (potenciómetro); CE (puente de conductividad); MO (calcinación-Walkley y Black); N (Kjeldahl); P (Bray 1-espectrofotometría); K (espectrofotometría de absorción atómica); Ca, Mg, Al, Zn, Fe, Cu, Mn, B, Pb, As, Cr y Cd (emisión atómica-ICP); S (turbidimetría); Cl (volumetría).

y malla. La precipitación pluvial se midió durante 2002 y 2003.

Se determinó el contenido de humedad volumétrica del suelo (HVS), por medio de reflectometría (TDR-HydroSense, Campbell), a una profundidad de 12 cm, durante julio y agosto de 2002, a intervalos aproximados de una semana (dependiendo de la disponibilidad del equipo). Antes de la aplicación de biosólidos se colectaron muestras de suelo a una profundidad de 20 cm. Tres muestreos más de suelo se realizaron durante la época de crecimiento de la vegetación, en agosto y noviembre de 2002, y en julio de 2003. Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente, se almacenaron en refrigeración y se determinó: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno (N) amoniacal (volumetría) + N nítrico (espectrofotometría), fósforo (P) y potasio (K) (sólo en 2002) con los mismos métodos que los biosólidos (Cuadro 1).

Al final de la época de crecimiento de las gramíneas de verano (noviembre), se realizaron cortes a 5 cm del suelo y las muestras se secaron en estufa, para determinar la producción de forraje. Los tratamientos se distribuyeron en las parcelas experimentales bajo un diseño completamente al azar. Se utilizó el análisis de varianza y la prueba de la diferencia mínima significativa para la comparación de medias de los tratamientos, con una probabilidad de 0.05. La prueba de Shapiro-Wilk (1965) se usó para el análisis de normalidad de errores experimentales y la prueba de Levene (1960) para el análisis de homogeneidad de

varianzas. Algunas variables (pH, CE, MO, P, N, HVS del 19 de julio, 13, 20 y 26 de agosto en 2002 y CE, P y N en 2003) se transformaron a logaritmo natural, para corregir problemas de normalidad de errores y homogeneidad de varianzas. Se realizaron análisis de tendencia de la respuesta de los nutrientes del suelo y producción de forraje a la dosis de biosólidos (Steel y Torrie, 1981). El paquete SAS se utilizó para el análisis estadístico (SAS Institute, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precipitación pluvial durante las épocas de crecimiento fue de 326 mm, en 2002, y de 389 mm, en 2003. La composición química de los biosólidos se presenta en el Cuadro 1; éstos se clasifican como "Excelentes", de acuerdo con la norma oficial. Antes de la aplicación de BIO-SUP, en las parcelas experimentales, se realizaron muestreos iniciales para determinar el estado original de las variables. El análisis de esta información reveló que no existían diferencias significativas entre parcelas experimentales para todas las variables evaluadas. Los promedios fueron: HVS = $13.8 \pm 1\%$, pH = 6.3 ± 0.03 , CE = 0.028 ± 0.001 dS m⁻¹, MO = $1.28 \pm 0.03\%$, N = 3 ± 0.3 mg kg⁻¹, P = 2 ± 0.2 mg kg⁻¹ y K = 352 ± 10 mg kg⁻¹. Por lo tanto, las diferencias posteriores pueden atribuirse a la aplicación de los tratamientos.

La HVS fue superior en la mayoría de las dosis en todas las fechas de muestreo durante la época de crecimiento del pastizal en 2002 (Cuadro 2). El 19 de julio se observó un incremento ($P \leq 0.0001$) de la HVS en las dosis de 30 hasta 90 Mg ha⁻¹ de biosólidos, con un máximo de $30 \pm 2\%$ en la dosis de 75 Mg ha⁻¹, en comparación con el testigo ($18.7 \pm 1\%$). A finales de julio y principios de agosto, el efecto fue menos marcado con diferencias ($P \leq 0.0001$) de 2 a 7% entre las parcelas testigo y las dosis de 45-90 Mg ha⁻¹. El 7 de agosto, la HVS fue mayor ($P \leq 0.0002$) con la aplicación de 90 Mg ha⁻¹ (22.4%), en comparación con el testigo (13.0%). Para el resto de las fechas de muestreo, excepto el 13 de agosto, la HVS no fue significativamente diferente entre las dosis de 45 hasta 90 Mg ha⁻¹, sin embargo, dichos valores fueron mayores, en comparación con las dosis de 15 y 30 Mg ha⁻¹ y el testigo. No se encontraron diferencias significativas en HVS entre estas últimas dosis. Estudios similares han reportado una mayor disponibilidad de humedad en el suelo en pastizales con la aplicación de biosólidos,

Cuadro 2. Humedad volumétrica del suelo a una profundidad de 0-12 cm con aplicaciones de biosólidos en un pastizal semiárido de Ojuelos, Jalisco, 2002.

Fecha de muestreo	Dosis de biosólidos (Mg ha ⁻¹)						
	0	15	30	45	60	75	90
	- - - - - % - - - - -						
19-Jul	18.7 e	20.7 de	22.9 cd	26.3 b	25.6 bc	30.0 a	28.2 ab
24-Jul	13.4 c	13.6 c	15.2 bc	17.8 ab	20.0 a	18.2 a	20.4 a
29-Jul	10.2 de	9.2 e	11.0 dc	11.8 bc	11.8 bc	13.0 ab	13.4 a
02-Ago	13.4 ab	13.6 ab	12.2 b	14.4 a	14.4 a	15.2 a	15.2 a
07-Ago	13.0 d	16.4 cd	16.2 cd	18.0 bc	19.6 abc	21.0 ab	22.4 a
09-Ago	11.8 c	11.4 c	11.2 c	14.4 b	16.0 ab	16.0 ab	16.8 a
13-Ago	9.8 ab	8.1 c	8.7 bc	10.2 a	10.6 a	11.2 a	10.6 a
20-Ago	17.6 b	17.2 b	18.2 b	23.4 a	22.2 a	21.2 a	22.2 a
26-Ago	10.4 c	10.8 bc	11.2 bc	11.9 ab	13.0 a	13.1 a	13.3 a

Valores con letras diferentes entre dosis de biosólidos en cada fecha indican diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$).

debido a una mayor infiltración de agua (Harris-Pierce *et al.*, 1995; Rostagno y Sosebee, 2001; Moffet *et al.*, 2005) y una mayor retención en el suelo (Hahm y Wester, 2004), poco tiempo después de un evento de lluvia. El 13 de agosto se observó una disminución en la humedad de suelo, con 10 Mg ha⁻¹, lo cual podría atribuirse a la pérdida por transpiración de las plantas presentes, ya que se tuvo una mayor producción de forraje en las parcelas tratadas.

En agosto de 2002, el pH ($P \geq 0.2997$), la MO ($P \geq 0.0569$) y el K del suelo ($P \geq 0.2155$) permanecieron similares entre tratamientos, con valores de 6.0 ± 0.03 , $1.3 \pm 0.04\%$ y 394 ± 14 mg kg⁻¹. La CE aumentó ($P \leq 0.0001$) en las dosis de 60 a 90 Mg ha⁻¹ de biosólidos (Cuadro 3). El N y el P se incrementaron ($P \leq 0.0001$) (Figuras 1 y 2) en forma cuadrática. Ambos nutrientes tuvieron mayores valores con la dosis creciente de biosólidos, aunque en proporciones diferentes. Las mayores concentraciones de N (169 ± 15 mg kg⁻¹) y de P (54 ± 6 mg kg⁻¹) se observaron en las dosis de 90 y 75 Mg ha⁻¹, las cuales fueron mayores que en los testigos, con 7 ± 1 y 5 ± 0.6 mg kg⁻¹.

En noviembre de 2002, el pH del suelo en el testigo, disminuyó ($P \leq 0.0001$) de 6.3 ± 0.1 a 5.3 ± 0.1 con 90 Mg ha⁻¹ de biosólidos (Cuadro 3). La MO ($P \geq 0.4768$) y el K ($P \geq 0.1610$) del suelo no presentaron diferencias significativas, con valores de $1.3 \pm 0.03\%$ y 368 ± 11 mg kg⁻¹. La CE se incrementó con la dosis de biosólidos desde 0.05 dS m⁻¹, en el testigo, hasta un máximo de 0.15 dS m⁻¹, con 90 Mg ha⁻¹ (Cuadro 3). El N se incrementó en forma lineal (Figura 1) y el P ($P \leq 0.0001$) en forma cuadrática (Figura 2). Las dosis con mayores valores de N (34 ± 5 mg kg⁻¹) y P (39 ± 3 mg kg⁻¹) fueron las de 90 y 75 Mg ha⁻¹, comparadas con los testigos 5 ± 1 mg kg⁻¹ y 3 ± 0.5 mg kg⁻¹.

En julio de 2003, el pH del suelo disminuyó ($P \leq 0.0001$), principalmente en la dosis de 75 Mg ha⁻¹, con 5.7 ± 0.1 , comparado con el testigo, con 6.3 ± 0.05 (Cuadro 3). La MO permaneció similar ($P \geq 0.832$) entre tratamientos, con un promedio de $1.3 \pm 0.03\%$. Los contenidos de N y P en el suelo se incrementaron ($P \leq 0.0056$, $P \leq 0.0001$), con la aplicación de biosólidos (Figuras 1 y 2). Los niveles de N se comportaron en

Cuadro 3. Características del suelo a una profundidad de 0 - 20 cm con aplicaciones de biosólidos en un pastizal semiárido de Ojuelos, Jalisco, 2002 y 2003.

Variable	Fecha	Dosis de biosólidos (Mg ha ⁻¹)						
		0	15	30	45	60	75	90
pH (1:2)	Nov-02	6.30 a [†]	6.10 a	6.10 ab	5.80 bc	5.70 cd	5.40 de	5.30 e
	Jul-03	6.30 a	6.30 ab	6.20 ab	6.00 bc	5.70 cd	5.70 d	5.80 cd
CE (dS m ⁻¹)	Ago-02	0.03 c	0.05 b	0.07 b	0.12 a	0.17 a	0.15 a	0.16 a
	Nov-02	0.05 d	0.05 d	0.07 cd	0.09 bc	0.14 ab	0.12 ab	0.15 a

[†] Valores con letras diferentes entre dosis de biosólidos en cada fecha indican diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$). CE = conductividad eléctrica.

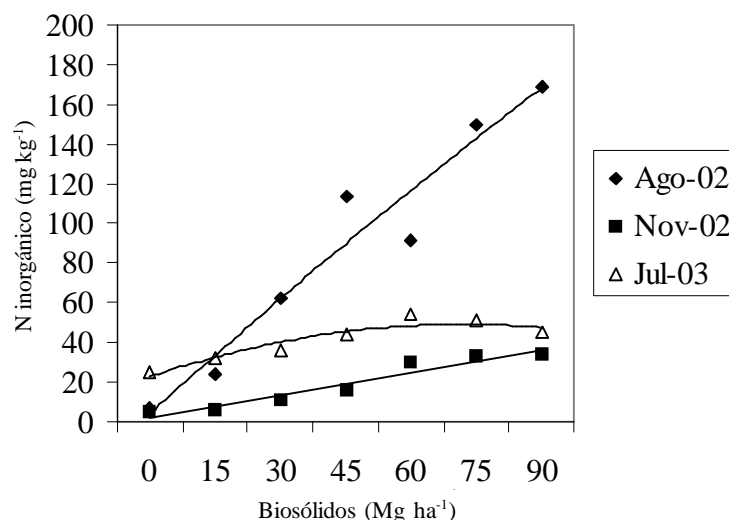


Figura 1. Contenido de nitrógeno inorgánico del suelo a una profundidad de 0 a 20 cm, con aplicaciones de biosólidos en un pastizal semiárido de Ojuelos, Jalisco, 2002 y 2003.

forma cuadrática, desde $24 \pm 3 \text{ mg kg}^{-1}$, en el testigo, hasta un máximo de $54 \pm 6 \text{ mg kg}^{-1}$, con 60 Mg ha^{-1} , mientras que el P se comportó en forma lineal, de $8 \pm 0.6 \text{ mg kg}^{-1}$, en el testigo, hasta un máximo de $95 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1}$, con 75 Mg ha^{-1} .

Los resultados anteriores podrían atribuirse a la mineralización de nutrientes (N y P) de los biosólidos aplicados, como se ha observado en experimentos de laboratorio y campo (Parker y Sommers, 1983; Barbarick *et al.*, 1996; Beltrán-Hernández *et al.*, 1999; Barajas-Aceves y Dendooven, 2001). Los resultados de este trabajo coinciden con lo reportado por diversos autores

(Fresquez *et al.*, 1990; Mata-González *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2003), en relación con los incrementos en el N y P del suelo, con la aplicación superficial de biosólidos. El contenido de K en el suelo no se incrementó con los tratamientos en este trabajo, a diferencia de otros estudios (Fresquez *et al.*, 1990; Martínez *et al.*, 2003), lo cual se atribuye al bajo contenido de K (0.1%) de los biosólidos.

En relación con la MO del suelo, es un resultado esperado, ya que los BIO-SUP no aportan materia orgánica a corto plazo, es decir, la descomposición de MO es un proceso lento en condiciones semiáridas.

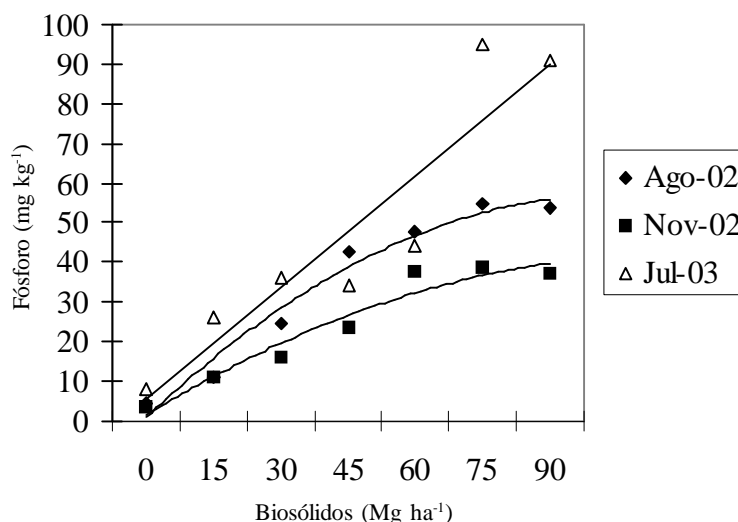


Figura 2. Contenido de fósforo del suelo a una profundidad de 0 a 20 cm, con aplicaciones de biosólidos en un pastizal semiárido de Ojuelos, Jalisco, 2002 y 2003.

Similares resultados se han obtenido en estudios en zonas semiáridas durante el primer año de estudio en suelo superficial (Horizonte A) (Fresquez *et al.*, 1990; Aguilar *et al.*, 1994). Por el contrario, Moffet *et al.* (2005) sí observaron incrementos en MO de la costra del suelo con BIO-SUP en dosis de 34 y 90 Mg ha⁻¹, en el primer año de estudio. El aumento de la CE del suelo puede atribuirse a la liberación de algunos elementos y compuestos orgánicos durante los procesos de descomposición de los biosólidos (Tisdale *et al.*, 1993; Brady y Weil, 1996). De cualquier manera, los niveles alcanzados de CE se encuentran por debajo de los límites que afectan el crecimiento de las plantas. La disminución del pH del suelo observada en este trabajo se podría atribuir al proceso de descomposición de la materia orgánica, al generarse ácidos e iones H, como consecuencia de la actividad microbiana (Tisdale *et al.*, 1993). Con las dosis altas (75 y 90 Mg ha⁻¹), el suelo presentó pH por debajo del óptimo (5.5-6.5) para el crecimiento de gramíneas (Tisdale *et al.*, 1993) durante 2002. El incremento en CE y la disminución del pH del suelo es similar a lo obtenido por otros autores con el uso de biosólidos en pastizales semiáridos de Nuevo México (Fresquez *et al.*, 1990; Aguilar *et al.*, 1994; Rostagno y Sosebee, 2001) y con fertilización en pastizales semiáridos de Jalisco (Arredondo, 1984).

Para el N del suelo, los mayores valores se obtuvieron en el mes de agosto de 2002, que es la mitad de la estación de crecimiento de las plantas de verano, y se presentaron condiciones de humedad del suelo y

temperaturas adecuadas para la actividad microbiana, mientras que dichos valores bajaron en noviembre, cuando las plantas ya habían absorbido la mayor parte de los nutrientes y las condiciones de humedad y temperatura fueron menos propicias. Además, la mayor parte de la mineralización de nutrimentos de los biosólidos se produce en los primeros tres meses después de la aplicación de los biosólidos y disminuye con el tiempo (Epstein *et al.*, 1978; Tisdale *et al.*, 1993). Un efecto diferente se observó en el P, con bajos valores durante el mes de agosto y noviembre de 2002, los cuales se incrementaron en el segundo año. Esto se pudiera deber a una inmovilización o precipitación del fósforo en el suelo, durante el primer año, y una mayor solubilización, en el segundo año (Tisdale *et al.*, 1993).

La producción de forraje se incrementó con la aplicación de biosólidos ($P \leq 0.0001$); éste estuvo compuesto por los zacates navajita (*Bouteloua gracilis*), tres barbas (*Aristida* sp.), navajita velluda (*B. hirsuta*) y escorpión (*B. scorpioides*). La producción de forraje se comportó en forma cuadrática, con incrementos máximos de 550%, en la dosis de 60 kg ha⁻¹ de N, en 2002, y de 650%, en la dosis de 90 Mg ha⁻¹, en 2003, comparados con los testigos (Figura 3). Dichas producciones siguieron tendencias similares, aunque a una mayor escala de lo encontrado en otros estudios, donde se observó un incremento máximo de forraje de 70%, con 45 Mg ha⁻¹ de biosólidos (Fresquez *et al.*, 1990), de 120%, con 35 Mg ha⁻¹ (Benton y Wester, 1998), de 270%, con 30 Mg ha⁻¹ (Pierce *et al.*, 1998), y de

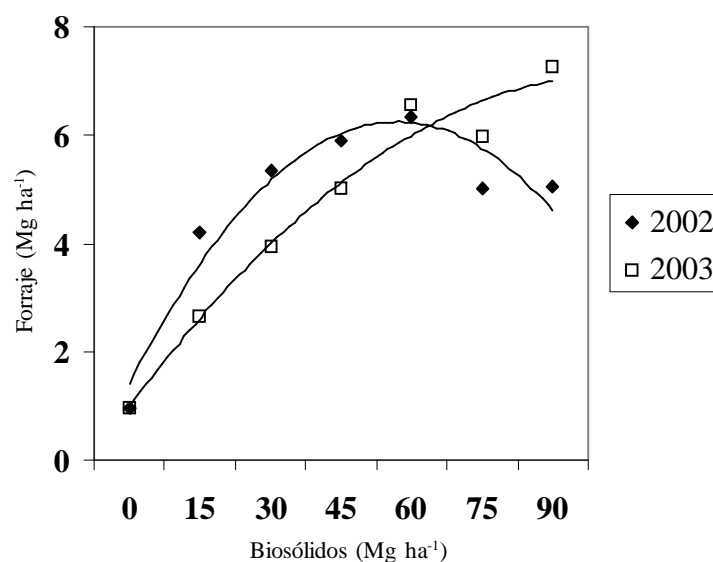


Figura 3. Producción de forraje total con aplicaciones de biosólidos en un pastizal semiárido de Ojuelos, Jalisco; 2002 y 2003.

90%, con 35 Mg ha⁻¹ (Jurado y Wester, 2001). Estos resultados también están por arriba de lo encontrado en trabajos de fertilización realizados en pastizales similares cercanos al área de estudio: Arredondo (1984) encontró un aumento de 130%, con dosis de 60 y 75 kg ha⁻¹ de N y P, y Jurado y Negrete (1990) encontraron incrementos de 50%, con dosis de 60 kg ha⁻¹ de N. La disminución de la producción de forraje en las dosis altas, durante el primer año, coincide con la disminución del pH del suelo, lo cual podría estar causando una inmovilización del fósforo, además de la liberación de sustancias y elementos tóxicos (Cr, Cd, As) de los biosólidos que pudieran interferir con el crecimiento de las plantas (Tisdale *et al.*, 1993; Brady y Weil, 1996). Los resultados favorables en suelo y forraje se atribuyen a la precipitación, el aporte de nutrientes de los biosólidos y una mayor captación y conservación de humedad en el suelo con las dosis de biosólidos.

CONCLUSIONES

El presente estudio mostró que los biosólidos pueden contribuir al mejoramiento del suelo. Los biosólidos conservaron la humedad del suelo en algunas fechas, principalmente en las dosis de 45 y 90 Mg ha⁻¹. La disponibilidad de nitrógeno y fósforo en el suelo se incrementó con los biosólidos durante la primera y segunda época. También se observaron algunos efectos considerados negativos, como la disminución del pH del suelo y un ligero aumento de la conductividad eléctrica del suelo, en las dosis de 45 a 90 Mg ha⁻¹. La materia orgánica y el potasio del suelo no se modificaron. Los biosólidos incrementaron en forma substancial la producción de forraje de pastizales semiáridos en todas las dosis aplicadas. Sin embargo, la dosis adecuada dependerá de un análisis integral de los costos y beneficios de la aplicación de biosólidos en pastizales. Los biosólidos, un producto actualmente utilizado en la agricultura, presentaron un moderado potencial para su uso benéfico en pastizales semiáridos. El análisis final de sus beneficios dependerá del monitoreo a largo plazo de las variables de suelos y la biodiversidad del ecosistema.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por el apoyo financiero recibido para la realización del proyecto de investigación I37450-B. Al personal de la Planta Municipal de Tratamiento de

Aguas Residuales de la Ciudad de Aguascalientes, Ags., por los biosólidos proporcionados.

LITERATURA CITADA

- Aguado G., A., M. Luna y R. A. Giner. 1989. Respuesta de la vegetación y el suelo de un pastizal de los Llanos de Ojuelos al pastoreo inmoderado. *Rev. Manejo Pastizales* 3: 3-8.
- Aguilar, R., S. R. Loftin, T. J. Ward, K. A. Stevens, and J. R. Gosz. 1994. Sewage sludge application in semiarid grasslands: effects on vegetation and water quality. Technical completion report. New Mexico Water Resources Research Institute-USDA Forest Service-University of New Mexico-New Mexico State University. Las Cruces, NM, USA.
- Arredondo J., T. 1984. Efecto de la fertilización de nitrógeno y fósforo en un pastizal mediano abierto en el norte de Jalisco. *Téc. Pecu. Méx.* 47: 49-59.
- Barajas-Aceves, M. and L. Dendooven. 2001. Nitrogen, carbon and phosphorus mineralization in soils from semiarid highlands of central Mexico amended with tannery sludge. *Bioresour. Technol.* 77: 121-130.
- Barbarick, K. A., J. A. Ippolito, and D. G. Westfall. 1996. Distribution and mineralization of biosolids nitrogen applied to dryland wheat. *J. Environ. Qual.* 25: 796-801.
- Barrios, J. A., A. Rodríguez, A. González, B. Jiménez, and C. Maya. 2001. Quality of sludge generated in wastewater treatment plants in Mexico: meeting the proposed regulation. pp. 54-61. *In: Specialized Conference on Sludge Management: Regulation, Treatment, Utilization and Disposal.* International Water Association (IWA)-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Metropolitana. Acapulco, México.
- Beltrán-Hernández, R. I., E. Coss-Muñoz, M. L. Luna-Guido, F. Mercado Garcia, C. Siebe, and L. Dendooven. 1999. Carbon and nitrogen dynamics in alkaline saline soil of the former lake Texcoco as affected by application of sewage sludge. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 601.
- Benton, M. W. and D. B. Wester. 1998. Biosolids effects on tobosgrass and alkali sacaton in a Chihuahuan Desert grassland. *J. Environ. Qual.* 27: 199-208.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1996. *The nature and properties of soils.* Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- COTECOCA (Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de Coeficientes de Agostadero). 1979. *Coeficientes de agostadero de la República Mexicana. Estado de Jalisco. Tomo II.* SARH-Subsecretaría de Ganadería. México, D. F.
- Epstein, E., D. B. Keane, J. J. Meisinger, and J. O. Legg. 1978. Mineralization of nitrogen from sewage sludge and sludge compost. *J. Environ. Qual.* 7: 217-221.
- FAO-ISSS-ISRIC (Food and Agriculture Organization-International Society of Soil Science-International Soil Reference and Information Centre). 1998. *World Reference Base for Soil Resources.* Rome, Italy. <http://www.fao.org/documents> (Consulta: febrero 2006).
- Figuroa V., U., M. A. Flores O. y M. Palomo. 2002. *Uso de biosólidos en suelos agrícolas. Folleto Técnico 3.* Campo Experimental Valle de Juárez-Centro de Investigación Regional

- Norte Centro-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chihuahua, México.
- Fresquez, P. R., R. E. Francis, and G. L. Dennis. 1990. Soil and vegetation responses to sewage sludge on a degraded semiarid broom snakeweed/blue grama plant community. *J. Range Manage.* 43: 325-331.
- Hahn, J. M. and D. B. Wester. 2004. Effects of surface-applied biosolids on grass seedling emergence in the Chihuahuan Desert. *J. Arid Environ.* 58: 19-42.
- Harris-Pierce, R. L., E. F. Redente, and K. A. Barbarick. 1995. Sewage-sludge application effects on runoff water quality in a semiarid rangeland. *J. Environ. Qual.* 24: 112-115.
- Jackson, R. B. and M. M. Caldwell. 1993. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual plants. *J. Ecol.* 81: 682-692.
- Jurado, G. P. y L. F. Negrete. 1990. Respuesta de un pastizal mediano abierto a la aplicación combinada de quema y fertilización en el noreste de Jalisco. *Rev. Manejo Pastizales* 4: 27-31.
- Jurado, P. and D. B. Wester. 2001. Effects of biosolids on tobosgrass growth in the Chihuahuan desert. *J. Range Manage.* 54: 89-95.
- Jurado G, P., M. Luna L. y R. Barretero H. 2004. Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Téc. Pecu. Méx.* 42: 379-395.
- Levene, H. 1960. Robust tests for equality of variance. pp. 278-292. *In: I. Olkin (ed.). Contributions to probability and statistics.* Stanford Univ. Press. Palo Alto, CA, USA.
- Martin del Campo M., G. R. Vaca, J. Lugo, M. V. Esteller, G. Gómez, and S. E. Garrido. 2001. Application of municipal sewage sludge in broad bean cultivation (*Vicia faba*) in agricultural valley of Toluca Mexico. pp. 465-469. *In: Specialized Conference on Sludge Management: Regulation, Treatment, Utilization and Disposal.* International Water Association (IWA)-UNAM-UAM. Acapulco, México.
- Martínez, F., G. Cuevas, R. Calvo, and I. Walter. 2003. Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem. *J. Environ. Qual.* 32: 472-479.
- Martínez, J. C., J. T. Hinojosa, L. H. Romero, E. S. Olivares, F. C. Montes, and S. S. Bolivar. 2001. Residual effects of biosolids in cauliflower (*Brassica oleracea* var. Botrytis) regarding yield, essential and heavy metal concentration in heads and soil. pp. 403-409. *In: Specialized Conference on Sludge Management: Regulation, Treatment, Utilization and Disposal.* International Water Association (IWA)-UNAM-UAM. Acapulco, México.
- Mata-González, R., R. E. Sosebee, and C. Wan. 2002. Shoot and root biomass of desert grasses as affected by biosolids application. *J. Arid Environ.* 50: 477-488.
- Medina, G. G., J. A. Ruiz C. y R. A. Martínez P. 1998. Los climas de México. Una estratificación ambiental basada en el componente climático. Libro Técnico 1. CIRPAC-INIFAP-SAGAR. Guadalajara, Jalisco. México.
- Moffet, C. A., R. E. Zartman, D. B. Wester, and R. E. Sosebee. 2005. Surface biosolids application: effects on infiltration, erosion and soil properties in Chihuahuan desert grasslands and shrublands. *J. Environ. Qual.* 34: 299-311.
- Outwater, A. B. 1994. Reuse of sludge and minor wastewater residuals. Lewis Publishers. Boca Raton, FL, USA.
- Parker, C. F. and L. E. Sommers. 1983. Mineralization of nitrogen in sewage sludges. *J. Environ. Qual.* 12: 150-156.
- Pierce, B. L., E. F. Redente, K. A. Barbarick, R. B. Brobst, and P. Hegeman. 1998. Plant biomass and elemental changes in shrubland forages following biosolids application. *J. Environ. Qual.* 27: 789-794.
- Rostagno, C. M. and R. E. Sosebee. 2001. Surface application of biosolids in the Chihuahuan desert: effects on soil physical properties. *Arid Land Res. Manage.* 15: 233-244.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos). 1982. Diagnóstico general del Municipio de Ojuelos para la elaboración de proyectos de desarrollo. Distrito 3. Lagos de Moreno, Jalisco, México.
- SAS Institute. 2005. SAS User's Guide. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Normas Oficiales Mexicanas. NOM-004-SEMARNAT-2002. <http://www.semarnat.gob.mx>. (Consulta: febrero 2005).
- Shapiro, S. S. and M. B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52: 591-611.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1981. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach, 2nd ed. International Student Edition. McGraw Hill. New York, NY, USA.
- Tisdale S. L., W. L. Nelson, J. D. Beaton, and J. L. Havlin. 1993. Soil fertility and fertilizers, 5th ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Uribe M., H. R., N. Chávez S., G. Orozco H. y M. S. Espino V. 2003. Biosólidos digeridos anaeróbicamente en la producción de maíz forrajero. *Agric. Téc. Mex.* 29: 25-34.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1989. Environmental regulations and technology. Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA625/10-84-003. Washington, DC, USA.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1999. Biosolids generation, use, and disposal in the United States. Office of Solid Waste. EPA-530-R-99-009. Washington, DC, USA.
- Van den Berg, J.J. 1993. Effects of sewage sludge disposal. *J. Land Degrad. Rehabil.* 4: 407-413.