

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSOLIDOS EN EL CRECIMIENTO DE *Jacaranda mimosifolia* (Gualanday) Y EN LAS CONDICIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO DEGRADADO

Ramiro Ramirez Pisco¹, Diana Cristina Velásquez Pomar² y Elizabeth Acosta Baena³

RESUMEN

*Los biosólidos, son materiales orgánicos, provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y su disposición final es uno de los principales problemas. El depósito en rellenos sanitarios, la incineración y la aplicación en suelos, son los principales métodos de disposición; los dos primeros son costosos, mientras que el último ha tenido aceptación debido a que puede ser usado como abono orgánico en cultivos y mejorar la fertilidad de suelos degradados, pero se pueden generar problemas de contaminación. En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de **Jacaranda mimosifolia** (Gualanday) y en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. En invernadero, se sembraron plántulas, utilizando un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y diez repeticiones. Los tratamientos correspondieron a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %. Se muestreó mensualmente la sobrevivencia, altura, diámetro del tallo y número de hojas, y la biomasa seca al final del experimento. Se realizaron análisis físicos y químicos del suelo, al inicio del estudio y a los tres meses. Los análisis químicos incluyeron pH, carbono orgánico oxidable, Al, Ca, Mg, K, CICE, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S, B, NO₃⁻, NH₄⁺; y los análisis físicos estabilidad de agregados, densidad aparente, densidad real y retención de humedad. El análisis estadístico se realizó entre tratamientos por cada mes, mediante análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Duncan, 95 % nivel de confianza). Los tratamientos con 4 % y 8 % de materia orgánica, afectaron negativamente el crecimiento de **J. mimosifolia**, debido posiblemente a la alta concentración de nutrientes y metales pesados hallados en el suelo, lo que pudo generar toxicidad, antagonismo y/o sinergismo. Las condiciones físicas se favorecieron al adicionar biosólidos, aumentándose la estabilidad de agregados y la retención de humedad, disminuyéndose la densidad aparente y densidad real.*

Palabras claves: Biosólido, suelo degradado, crecimiento, *Jacaranda mimosifolia*.

ABSTRACT

¹ Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Escuela de Biociencias. A.A. 3840, Medellín, Colombia. <rramirez@unal.edu.co>

² Ingeniera Forestal. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <aby530@yahoo.com>

³ Ingeniera Forestal. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <elibet919@yahoo.es>

Recibido: Agosto 2 de 2006; aceptado: Mayo 29 de 2007.

EFFECT OF BIOSOLIDS APPLICATION ON THE GROWTH OF Jacaranda mimosifolia (Gualanday) AND UNDER PHYSICAL AND CHEMICAL CONDITIONS OF A DEGRADED SOIL

*The biosolids are organic materials, derived from wastewater treatment of domestic and industrial sewage. One of the main problems of wastewater treatment plants is the final destination of the biosolids. Their deposit in sanitary fillers, the incineration and land application are the main methods of dispose; the first two methods are expensive, while the last one, is gaining acceptance, because the biosolids are a resource that can be used as supplementary organic fertilizer. Furthermore, land application of biosolids can help to improve declined soil fertility in degraded soils, but it can be generated contamination problems. The aims of this study were to investigate the effect of biosolids application on the growth of **Jacaranda mimosifolia** (Gualanday) and the changes on physical and chemical conditions of a degraded soil. This arboreal specie was planted in a degraded soil amended with biosolids, and was grown in a greenhouse. The treatments corresponded to contents of organic matter in the mixture (soil-biosolid) of 0 %, 2 %, 4 % and 8 %, in a completely randomized design with four treatments and ten replications. Monthly samplings were realized to get information about the variables: survival, height and diameter of stem, and number of leaves. The dry biomass was evaluated at the end of the study. The physical and chemical analyses were made at the beginning of the experiment and three months later. The chemical analyses included pH, oxidable organic carbon, Al, Ca, Mg, K, CICE, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S, B, NO₃⁻, NH₄⁺, and the physical analyses included aggregate stability, bulk density, real density and water retention. The statistical analysis between treatments was realized every month, by analysis of variance and Duncan's multiple range test, using a 95 % confidence level. The treatment with a 2 % of organic matter was not affected the plant growth and was similar with the untreated control. The treatments with a 4 % and 8 % of organic matter caused a lower survival, a lower growth in height, diameter, and lesser number of leaves and a lower production of biomass. The high concentration of nutrients found on the soil, probably generated toxicity, antagonism and/or synergism problems. The physical soil properties were favored with the addition of biosolids, possibly for its organic matter contents, appearing an increase in the aggregate stability and the humidity retention, and a diminution of the bulk density and the real density.*

Key Words: Biosólidos, degraded soil, growth, *Jacaranda mimosifolia*.

En el marco de la política de preservación de la calidad del agua, se han construido plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales generan un subproducto inevitable: los biosólidos. Estos están formados principalmente por partículas sólidas no retenidas en los pretratamientos físicos del agua, por materia orgánica, metales pesados y microorganismos (Daguer 2003).

En Colombia, debido a los pocos reportes para la utilización de estos subproductos y a la ausencia de disposiciones generales acerca de la

descarga, transporte o depósito de estos materiales, millones de toneladas de biosólidos, se disponen frecuentemente en sitios de relleno y demás lugares inadecuados, provocando impactos negativos sobre el ambiente (Gamrasni, 1985).

Aunque la aplicación de estos productos al suelo, se realiza en ocasiones con el propósito de facilitar la recuperación de áreas degradadas, se corre el riesgo de que estos materiales se utilicen de manera incontrolada, constituyéndose en un factor de contaminación

y deterioro ambiental, lo cual está contemplado en el literal l del artículo 8 del Decreto-ley 2811 de 1974 de la normatividad ambiental colombiana.

Frente a esta situación, se han realizado estudios relativos al empleo de biosólidos en la restauración de sitios dedicados a actividades extractivas, en cultivos agrícolas y en plantaciones forestales, con el fin de generar soluciones alternativas a la disposición final de estos residuos.

Para el caso del departamento de Antioquia (Colombia), la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando generó un total de 28.748 toneladas de biosólido en el año 2003, los cuales se aplicaron en suelos degradados en dosis de 450 t ha⁻¹ en base seca y en terrenos pertenecientes a los municipios de Amalfi y Anzá; en municipios como Guarne, la Ceja, Sopetrán y Venecia, entre otros, se aplicaron 30 t ha⁻¹ base seca de biosólido en pastizales y floricultura. Además se aplicaron biosólidos para la revegetalización de taludes y producción de compostado (Empresas Públicas de Medellín (EPM) 2004).

Estudios de la aplicación de biosólidos en taludes de canteras en España, evidenciaron, incluso antes del desarrollo de la cubierta vegetal, una reducción de las tasas de erosión potencial en un 50 %, un aumento de la capacidad de infiltración, la disminución de las pérdidas por salpicadura y del arrastre de sedimentos por escorrentía (Alcañiz 2003).

En cuanto a la aplicación de biosólidos en los cultivos, se destaca la inves-

tigación realizada en Bogotá, por Ramírez y Pérez 2006, con *Raphanus sativus* - Rábano Rojo. En este estudio, se evaluó el crecimiento y desarrollo de las plantas teniendo en cuenta variables tales como la biomasa seca de hojas y raíces, altura del tallo, área foliar, y la bioacumulación de elementos traza en los rábanos cosechados.

Como resultado, se favoreció el crecimiento y desarrollo de las plantas con los tratamientos de 50 % y 25 % de mezcla de biosólido con el suelo, el tratamiento con 75 % biosólido presentó un menor desarrollo, crecimiento y producción del cultivo, mientras que el tratamiento 100 % biosólido, provocó una baja germinación, además no presentó acumulación en la raíz, que es el producto cosechable.

Los niveles de acumulación de metales pesados sobrepasaron los máximos permitidos con el tratamiento 75 % biosólido. Se encontró que la utilización del biosólido en la agricultura puede ser una alternativa viable para su disposición final, ya que presentan una gran cantidad de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Na, Fe y Zn) y materia orgánica que favorecen el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos; sin embargo, en altas concentraciones o aplicado sin mezclar con suelo va en detrimento del crecimiento y producción de las plantas de rábano.

En Chile, con el desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales, se encontró que en un corto plazo la adición de éstos incrementa la productividad; ya que los biosólidos

pueden suministrar los nutrientes necesarios para el desarrollo de los árboles, especialmente nitrógeno y fósforo. A largo plazo se presenta una continua y lenta liberación de nutrientes al suelo (Aguilera 2003).

Investigaciones realizadas en la Universidad de Washington (EEUU), evidenciaron que algunas especies forestales tratadas con biosólidos como fertilizante, presentaron un mayor incremento tanto en altura como en diámetro, comparado con muestras control donde éste no fue aplicado (Washington State Department of Ecology (WSDE) 2002).

En parcelas experimentales en la localidad de Nelson (Nueva Zelanda), después de tres años de aplicación de biosólidos líquidos en suelos arenosos donde se tenían plantaciones de Pino radiata de seis años, se presentaron incrementos en volumen del 27 % y 39 % en comparación con las parcelas testigo (Aguilera 2003).

En Australia la aplicación de biosólidos en dosis de 200 y 1.000 kg N ha⁻¹, para un rodal de 21 años, generó incrementos en volumen que van del 12 % al 42 %. La tasa mínima de aplicación ha sido determinada en 350 kg de N ha⁻¹ comparable a una aplicación de fertilizante tradicional (Aguilera 2003).

En la presente investigación se estudió el efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de *Jacaranda mimosifolia* y en las condiciones físicas y químicas del suelo, durante la etapa de vivero (tres meses).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se realizó en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, bajo condiciones de invernadero. El área, ubicada a una altitud aproximada de 1526 m, con una temperatura promedio anual de 23 °C, humedad relativa del 66 % y una precipitación promedio anual de 1397 mm, se encuentra en la zona de vida bosque húmedo premontano (bh-PM), según la clasificación de Holdridge.

Material vegetal. Se emplearon plántulas de la especie arbórea *Jacaranda mimosifolia* (Gualanday), las cuales están adaptadas al rango altitudinal y de temperatura que predomina en el lugar antes mencionado. En total se emplearon 40 plántulas, las cuales tenían un mes de germinadas.

Suelo. Se utilizó un suelo proveniente del municipio de Itagüí, degradado por explotación a cielo abierto de material para la industria ladrillera. Algunas características físicas y químicas del suelo se describen en la Tabla 1.

Biosólidos. Se aprovecharon biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando del municipio de Itagüí (Antioquia) (Tabla 1). Este material fue aplicado al suelo teniendo en cuenta su contenido de materia orgánica y su composición química reportada en el análisis de laboratorio.

Diseño experimental. Se usó un diseño completamente al azar con cuatro

tratamientos y 10 repeticiones por tratamiento, para un total de 40 unidades experimentales. Los tratamientos correspondieron a contenidos de materia

orgánica en la mezcla, suelo-biosólido, de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %. Los códigos usados para cada tratamiento fueron: B0, B1, B2 y B3, respectivamente.

Tabla 1. Caracterización física y química del suelo y del biosólido utilizado.

Parámetro	Unidad	Suelo	Biosólido	Método
pH		4,9	6,8	(1:1 suelo:agua), potenciómetro
MO	%	0,23	21,3	Walkley y Black
Al	Cmol(+) kg ⁻¹	1,1		KCl 1M
Ca	Cmol(+) kg ⁻¹	7,1	28,7	Acetato de amonio 1M
Mg	Cmol(+) kg ⁻¹	4,4	6	Acetato de amonio 1M
K	Cmol(+) kg ⁻¹	0,34	1,2	Acetato de amonio 1M
CICE	Cmol(+) kg ⁻¹	12,9	35,9	Acetato de amonio
P	mg kg ⁻¹	22	340	Bray II modificado
S	mg kg ⁻¹	32	1511	Fotolorimétrico
Fe	mg kg ⁻¹	49	189	DPTA
Mn	mg kg ⁻¹	40	152	DPTA
Cu	mg kg ⁻¹	1	25	DPTA
Zn	mg kg ⁻¹	1	110	DPTA
B	mg kg ⁻¹	0,3	3,3	Agua caliente
N-NO3	mg kg ⁻¹	3		Kjeldahl con reducción de nitratos
N-NH4	mg kg ⁻¹	20		Kjeldahl con reducción de nitratos
Densidad aparente	g cm ⁻³	1,28		Terrón parafinado
Densidad real	g cm ⁻³	2,51		Picnómetro
Porosidad total	%	49		
Microporos	%	44,2		
Macroporos	%	4,82		

Variables evaluadas en la planta. Se realizaron muestreos mensuales para la sobrevivencia, altura, diámetro del tallo, número de hojas y biomasa seca al final del experimento. La sobrevivencia se determinó contando el número de plantas vivas, y obteniendo un porcentaje entre la relación de éstas sobre el total de plantas sembradas por tratamiento. La altura se determinó tomando la medida desde la base del tallo hasta el ápice del mismo. El diámetro se midió a 1 cm de la base del

tallo, con ayuda de un pie de rey digital. Cada mes se realizó el conteo de las hojas presentes en cada planta. La biomasa se determinó, separando la parte aérea de las raíces, el material se secó en estufa a 105 °C durante dos días, luego de los cuales se obtuvo su peso.

Variables evaluadas en el suelo. Se realizaron análisis físicos de estabilidad de agregados, por medio de tamizado en seco y en húmedo, método de Yoder

modificado por Tiulin (IGAC 1990), retención de humedad utilizando ollas y platos de presión, densidad aparente y densidad real y los análisis químicos incluyeron pH, carbono orgánico oxidable, Al, Ca, Mg, K, Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S, B, NO₃⁻, NH₄⁺. Las metodologías empleadas se presentan en la Tabla 1.

Análisis estadístico de los resultados.

Se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Duncan) entre tratamientos y en cada mes, usando un nivel de confianza del 95 %. Cuando en alguno de los tratamientos la sobrevivencia fue inferior al 40 %, este no se tuvo en cuenta para el análisis

estadístico, debido al bajo número de repeticiones. Para los datos obtenidos de cada una de las variables del suelo, se creó una nueva variable a partir de la diferencia entre el dato final y el obtenido al inicio, con la cual se realizó análisis de varianza, y prueba de comparación múltiple de Duncan entre medias de tratamientos.

RESULTADOS

Variables evaluadas en la planta. Al final del ensayo, en el testigo (B0) y en el tratamiento B1 la sobrevivencia fue del 100 %, mientras que en los tratamientos B2 y B3 solo sobrevivió el 30 % y el 20 %, respectivamente (Figura 1).

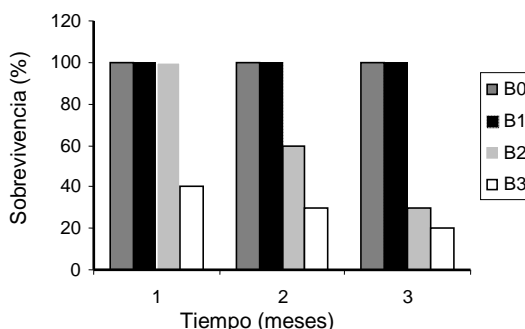


Figura 1. Sobrevivencia de *Jacaranda mimosifolia*. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente.

Con respecto a la altura, los tratamientos B2 y B3 presentaron un incremento menor de 0,7 cm, el cual estuvo por debajo de los tratamientos B0 y B1. Los resultados de los tratamientos B3 y B2 solo se presentan

hasta el primero y segundo mes, respectivamente, debido a que ambos obtuvieron una sobrevivencia inferior al 40 % a partir de estos meses (Figura 2).

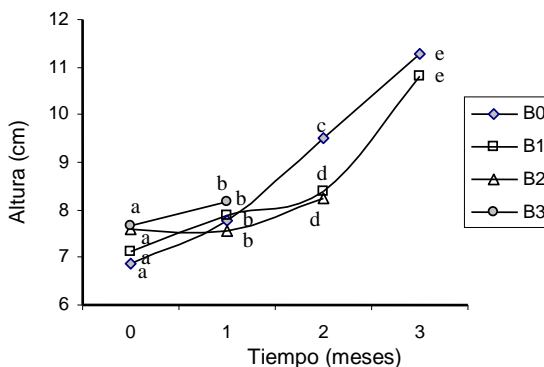


Figura 2. Crecimiento en altura del tallo en *Jacaranda mimosifolia* para cada tratamiento durante tres meses. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

Para el diámetro, solo se encontraron diferencias significativas a partir del segundo mes. Al final del estudio, el tratamiento B0, presentó el mayor incremento diamétrico (1,47 mm), en comparación con el tratamiento B1 el

cual obtuvo un incremento de 0,68 mm. El tratamiento B2 alcanzó un incremento de 0,23 mm en el segundo mes y el tratamiento B3 presentó un incremento de 0,33 mm en el primer mes (Figura 3).

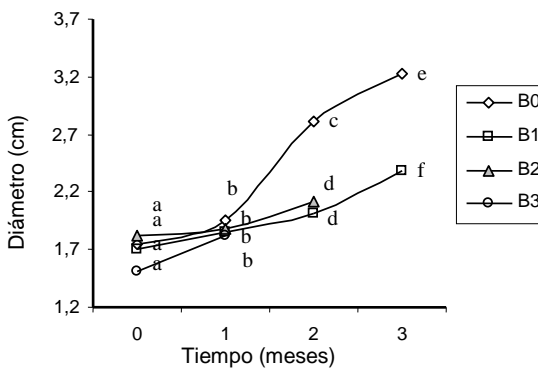


Figura 3. Crecimiento diamétrico del tallo en *Jacaranda mimosifolia* para cada tratamiento durante tres meses. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

Para la variable referente al número de hojas, se evidencia en la Figura 4, que los mayores valores para esta variable se presentaron en los tratamientos B0 y B1, alcanzando al final del ensayo, valores promedio de 16 hojas y 15 hojas, respectivamente. De las observaciones realizadas durante el experimento, se

destaca que en los tratamientos con aplicación media y máxima de biosólido, las hojas no eran persistentes y se marchitaban rápidamente. La mayor producción en biomasa seca de raíces se evidenció en el tratamiento B0 (1,01 g) en comparación con el tratamiento B1 (0,60 g) (Figura 5).

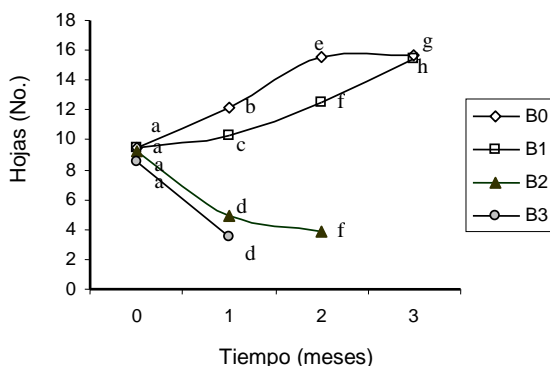


Figura 4. Número de hojas de *Jacaranda mimosifolia* para cada tratamiento durante tres meses. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

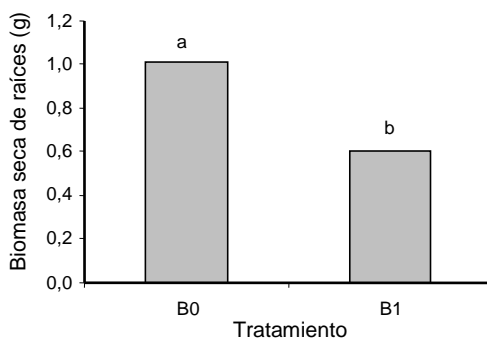


Figura 5. Biomasa seca de raíces de *Jacaranda mimosifolia* para cada tratamiento durante tres meses. B0 y B1 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 % y 2 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

Para la biomasa seca aérea, el mayor valor se obtuvo en el tratamiento B1 (1,04 g), aunque este no presentó una diferencia estadísticamente significativa con el testigo (Figura 6). Los trata-

mientos B2 y B3 presentaron una sobrevivencia muy baja al final del estudio (menor a 40 %), motivo por el cual, no se tuvo en cuenta su producción de biomasa para el análisis de resultados.

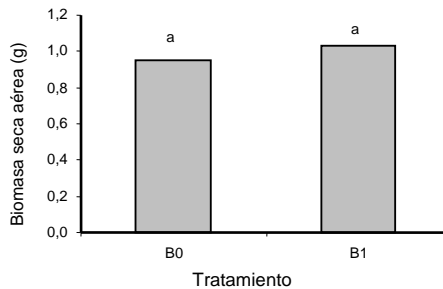


Figura 6. Biomasa seca aérea de *Jacaranda mimosifolia* para cada tratamiento durante tres meses. B0 y B1 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 % y 2 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

Análisis físicos del suelo. Tanto en la densidad aparente (D_a) como en la densidad real (D_r), se evidenció una disminución en el valor de estas variables al adicionar biosólido en las

cantidades correspondientes a los tratamientos B2 y B3 (Figuras 7 y 8, respectivamente). El tratamiento B1 no presentó una diferencia significativa con el testigo (B0).

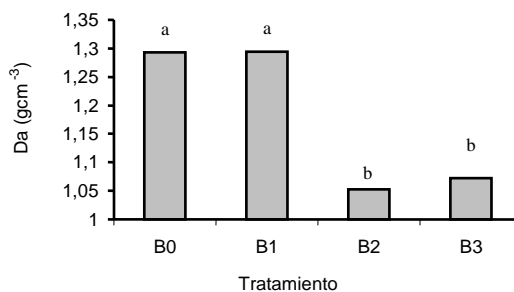


Figura 7. Cambios en la densidad aparente (D_a) del suelo para cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

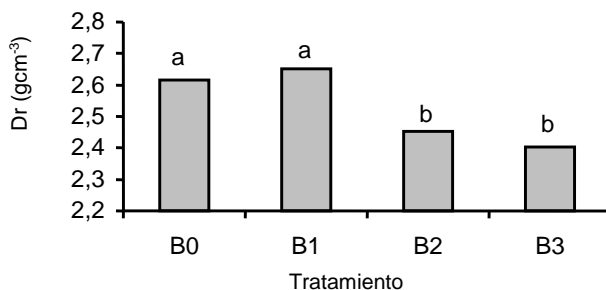


Figura 8. Cambios en la densidad real (D_r) del suelo para cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente. Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

En la Figura 9 se observa que al final del estudio, se encontró que la capacidad de retención de humedad se incrementó con la aplicación de biosólido. En el tratamiento B3 se presentó la curva de retención mas alta, y la retención de

humedad mas baja se presentó en el testigo. La porosidad total aumentó en los tratamientos con biosólido en comparación con el testigo, donde los tratamientos B2 y B3 presentaron los valores más altos (Tabla 2).

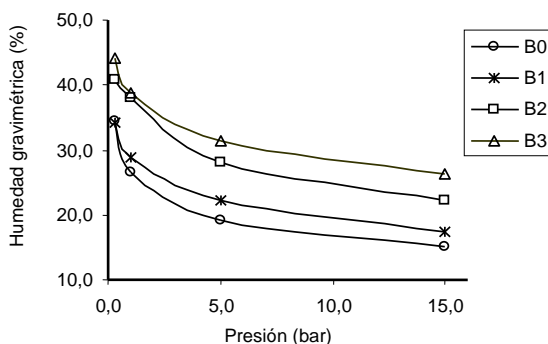


Figura 9. Cambios en la retención de humedad del suelo para cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente.

Tabla 2. Distribución de poros en el suelo en cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*.

Tratamiento	Porosidad total (%)	Microporos (%)	Macroporos (%)
B0	50,56	44,53	6,03
B1	51,20	44,19	7,01
B2	57,08	43,11	13,97
B3	55,37	47,32	8,04

Con respecto a la estabilidad estructural, en el análisis en seco, existe un predominio de agregados mayores a 2 mm en todos los tratamientos, el porcentaje de agregados > 5 mm se incrementó en los tratamientos B2 (59,7 %) y B3 (60,6 %), con respecto al testigo (33,4 %) y al tratamiento B1 (37,3 %).

En el análisis realizado en húmedo, el porcentaje de agregados de tamaño menor de 0,5 mm, predomina en el tratamiento testigo (B0), y a medida que aumenta la concentración de biosólido en la mezcla, el porcentaje de este tipo

de agregados disminuye, pasando de un valor de 55,6 % en el testigo a 12,4 % en el tratamiento con mayor cantidad de biosólido (B3) (Figura 10).

De la Tabla 3 se destaca que, aunque el tratamiento B2 no presentó una diferencia estadísticamente significativa con el testigo, esta dosis de biosólido empezó a generar un aumento en el grado de estabilidad estructural (EE), en el diámetro ponderado medio (DPM), y una disminución en la variable ΔI . Dichos cambios se acentuaron con el incremento de las dosis de biosólido aplicadas (B2 y B3) (Tabla 3).

Tabla 3. Variables del análisis de estabilidad estructural del suelo en cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*.

Tratamiento	DPM en húmedo	DPM en seco	ΔI	EE en húmedo
B0	1,53 a	3,62	2,10 a	5
B1	2,23 a	4,03	1,81 a	4
B2	3,51 b	5,05	1,53 ab	3
B3	4,46 b	4,99	0,52 b	2

*Diámetro ponderado medio (DPM). * ΔI : delta de inestabilidad = DPM en seco menos DPM en húmedo.

*Grado de estabilidad estructural (EE): % de agregados menores a 0,5 mm; (1) muy alta < 10 %, (2) alta 10-20 %, (3), media 20-30 %, (4) baja 30-50 % y (5) muy baja > 50 %.

Los tratamientos con distinta letra, representan diferencias significativas (Duncan 5 %).

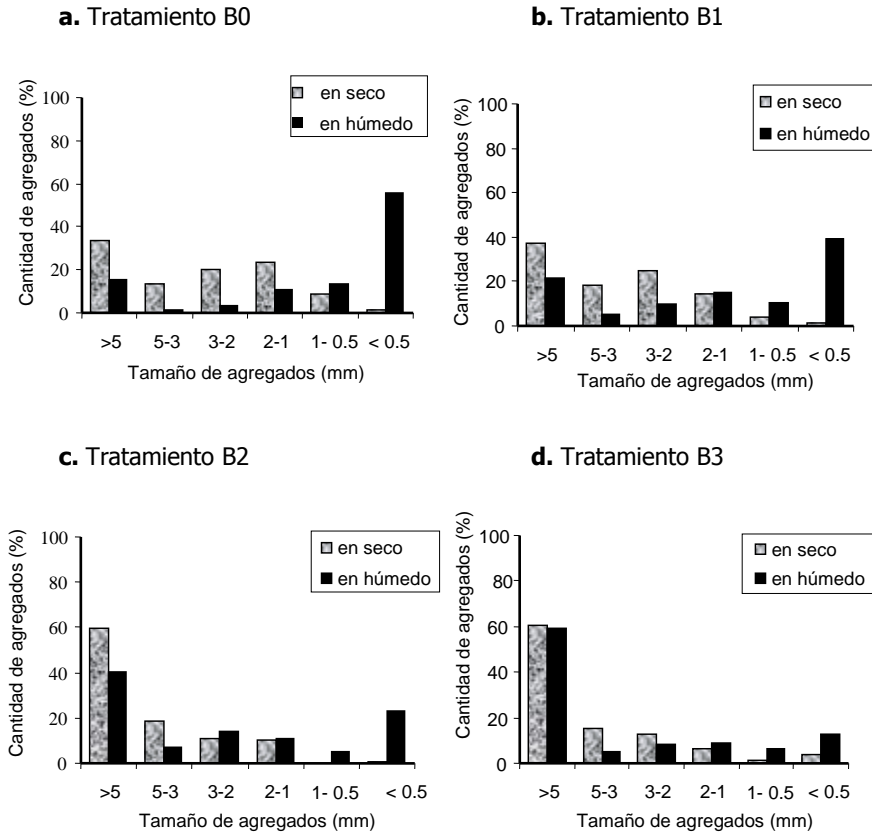


Figura 10. Distribución de agregados del suelo para cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*. B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente.

Análisis químicos del suelo. Con el incremento de la cantidad de biosólido aplicada, se halló un aumento del pH, de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), del carbono orgánico oxidable, del Ca, K, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S y B (Tabla 4). El contenido de Aluminio disminuyó con la aplicación de la dosis mínima de biosólido (B1). En los tratamientos B2 y B3 no se tienen

los resultados de esta variable, debido a que en estos tratamientos se presentó un pH superior a 5,5 donde el aluminio se precipita (Tabla 4). El contenido de magnesio presentó poca variación entre los tratamientos y sólo el tratamiento B3 presentó una diferencia significativa con respecto al testigo (Tabla 4). El contenido de nitrógeno, en las formas de NO_3 y NH_4 , aumentó con la aplicación

de bio-sólido. Aunque en el análisis de laboratorio, el contenido de NO₃ en el tratamiento B0 no fue detectable, se presentó una diferencia significativa entre el valor inicial encontrado en el suelo y los valores obtenidos con los tratamientos B1, B2 y B3, los cuales

fueron de 232, 286 y 324,5 ppm, respectivamente. Para NH₄ puede observarse que los contenidos de este compuesto, hallados en todos los tratamientos son significativamente diferentes (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de los análisis químicos del suelo en cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*.

Tipo de análisis	Unidad	Suelo	Biosólido	B0	B1	B2	B3
pH		4,9	6,8	5,2 a	5,15 a	5,7 b	5,8 b
MO	%	0,23	21,3	0,25 a	1,05 b	2,5 c	3,85 d
Al	cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	1,1		0,7 a	0,4 b		
Ca	cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	7,1	28,7	8,45 a	12,35 b	17,05 c	19,35 c
Mg	cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	4,4	6	4,85 a	5 a	4,9 a	4,35 b
K	cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	0,34	1,2	0,385 a	0,405 a	0,55 b	0,59 b
CICE	cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹¹	12,9	35,9	14,35 a	18,1 b	22,5 c	24,25 c
P	mg kg ⁻¹	22	340	17,5 a	83 b	136,5 c	164,5 d
S	mg kg ⁻¹	32	1511	42,5 a	149,5 b	300 c	574,5 d
Fe	mg kg ⁻¹	49	189	41 a	75,5 b	111,5 c	121 c
Mn	mg kg ⁻¹	40	152	32,5 a	48 b	49,5 b	67 c
Cu	mg kg ⁻¹	1	25	1,0 a	3,0 b	5,0 c	7,0 d
Zn	mg kg ⁻¹	1	110	1 a	17 b	26 c	40 d
B	mg kg ⁻¹	0,3	3,3	0,3 a	1,45 b	2,45 c	2,9 d
N-NO3	mg kg ⁻¹	3	5	—	232 a	286 b	324,5 c
N-NH4	mg kg ⁻¹	20	1016	5 a	23 b	45,5 c	80,5 d

B0, B1, B2 y B3 corresponden a contenidos de materia orgánica en la mezcla de 0 %, 2 %, 4 % y 8 %, respectivamente. Suelo y biosólido corresponden a los resultados del análisis químico del suelo y del biosólido fresco respectivamente; obtenidos antes de iniciar el experimento. Los tratamientos con distinta letra, indican diferencia significativa (Duncan 5 %).

DISCUSION

Variables evaluadas en la planta. Es importante anotar que en el tratamiento B1, se presentó una alta variabilidad al final del estudio observándose plantas frondosas y altas versus algunas plantas pequeñas; presentándose una des-viación estándar superior en las variables de crecimiento en el tratamiento B1 en

comparación con el testigo, lo cual posiblemente no permitió hallar diferencias significativas entre estos tratamientos.

En los tratamientos B2 y B3 el comportamiento de las variables diámetro y altura del tallo, fue similar durante el primer mes de estudio, pero a partir del segundo mes se comenzó a evidenciar

una respuesta negativa en estas variables, en donde las dosis más altas de biosólido, inhibieron el crecimiento. Se presentaron plantas pequeñas, con poca producción de hojas nuevas, un deficiente desarrollo de raíces y una baja sobrevivencia.

Lo anterior coincide con lo obtenido en los análisis químicos del suelo, donde puede verse que elementos como K, P, Fe, Mn, Cu, Zn y B, se encontraron en niveles altos en los tratamientos B2 y B3. Tal situación, combinada con el alto contenido de metales pesados del biosólido, fueron la probable y principal

causa del deterioro del crecimiento de las plantas, puesto que según Bennett 1993, algunos elementos esenciales para las plantas, cuando son tomados en exceso, usualmente causan desequilibrios con otros nutrientes y ocasionan un bajo crecimiento de las plantas.

De acuerdo con la Tabla 5, altas concentraciones de algunos nutrientes generan síntomas de toxicidad en las plantas, motivo por el cual no es sencillo atribuirle la causa del bajo crecimiento y sobrevivencia a un elemento en particular.

Tabla 5. Síntomas de toxicidad en las plantas causados por cantidades excesivas de algunos nutrientes.

Elemento	Síntomas de toxicidad	Referencia
K	Dificulta la absorción de Mg y de Ca	Fernández <i>et al.</i> 2001, Fageria <i>et al.</i> 1991
P	Causa necrosis, clorosis intervenal en hojas jóvenes, exceso en el crecimiento de las raíces con respecto a la parte aérea	Fageria <i>et al.</i> 1991, Salisbury y Ross 1994
Fe	Causa pardecimiento de hojas viejas	Fageria <i>et al.</i> 1991
Mn	Causa necrosis en hojas viejas	Fernández <i>et al.</i> 2001
Cu	Inhibe la elongación de raíces y causa daño en la membrana de la pared celular. Reduce la producción de ramas y causa la elongación exagerada de tallos	Bennett 1993 Fageria <i>et al.</i> 1991
B	Causa necrosis de hojas viejas	Fernández <i>et al.</i> 2001 Fageria <i>et al.</i> 1991
NH₄	Reduce el nivel de potasio en la planta y puede causar marchitamiento, clorosis intervenal y pecíolos más cortos en las hojas jóvenes; el amarillamiento puede extenderse a las hojas viejas. Los márgenes de las hojas pueden morir y las hojas se curvan hacia arriba	Morgan 2000.

Análisis físicos del suelo. La disminución de la densidad aparente en los tratamientos B2 y B3, puede explicarse por el mayor contenido de materia orgánica que presentan estos tratamientos; ya que éste es un material menos denso y con capacidad de formar agregados más grandes. Estos resultados, concuerdan con los obtenidos por García *et al.* 2004, donde la aplicación de las mayores dosis de biosólido, ocasionaron una disminución en la densidad aparente del suelo. La situación anterior, también genera cambios en la porosidad del suelo, puesto que existe una relación inversa entre estas dos propiedades; es decir, a medida que la densidad aparente se hace menor, la porosidad se hace mayor y finalmente, esto será lo que determine la capacidad de aireación y el comportamiento del agua en el suelo (Castro 1998, Montenegro 2003).

La disminución de la densidad real del suelo en los tratamientos con una mayor cantidad de biosólido aplicada (B2 y B3), puede explicarse por el aporte de materiales orgánicos provenientes del biosólido, puesto que estos son materiales más livianos y ocupan un mayor volumen. Lo anterior coincide con lo expuesto por Castro 1998 y Montenegro 2003, donde ambos reportan que la densidad real puede disminuir cuando se incrementa el contenido de materia orgánica en el suelo.

El aumento de la capacidad de retención de humedad del suelo, al adicionar biosólidos en éste, puede tener su explicación en el incremento del contenido de materia orgánica, el cual además de poseer una alta

capacidad de retener agua, facilita la formación de agregados estables y el aumento de la porosidad, permitiendo así que el agua penetre en el suelo y se mueva dentro de él (Barrera 2003).

Los suelos con alta proporción de limo y arcilla, como es el caso del suelo en estudio, tienen muchos microporos, los cuales son muy pequeños para permitir el movimiento libre de aire y de agua. Tal situación, puede ser contrarrestada con un buen suministro de materia orgánica al generar poros más grandes (Barrera 2003). La aplicación de un 4% y un 8 % de materia orgánica, en los tratamientos B2 y B3 respectivamente, favorecieron considerablemente el aumento de la porosidad y generaron una mejor distribución de microporos y macroporos (Tabla 2).

Según Montenegro 2003, el tamaño mas apropiado del agregado, asociado a un equilibrio entre macro y micro poros, esta comprendido entre 1 y 3 mm de diámetro, ya que estas condiciones son propicias para el crecimiento vegetal.

Durante el período de estudio, se presentaron cambios favorables en la estructura del suelo con la aplicación de biosólido. Los resultados presentados para esta variable, son comparables a los obtenidos por García *et al.* 2004, donde se reportó el aumento en porcentaje de agregados estables del suelo con la aplicación de biosólidos; atribuyendo tal efecto a los contenidos de carbono orgánico y carbohidratos contenidos en el biosólido. Alcañiz 2003, Guerra, Luna y Hernández 2004, también hacen referencia a la generación de mejores condiciones de las propiedades físicas

del suelo, en particular de la estabilidad estructural, con la aplicación de biosólidos.

Los cambios presentados en la estabilidad estructural del suelo, pueden ser atribuibles a iones flocculantes como el calcio y agentes cementantes como la materia orgánica, presentes en los biosólidos. Los iones de calcio favorecen la formación de agregados del suelo al mantener unidas las arcillas y la materia orgánica; una función comparable con la que cumplen los óxidos de Fe y Al (Barrera 2003, Fernández *et al.* 2001).

Con respecto a la materia orgánica, su papel en la formación de agregados estables, comienza luego de que ésta pasa por procesos de descomposición, donde se generan ácidos y diversos compuestos orgánicos que intervienen en la construcción de los agregados (Montenegro 2003, Barrera 2003). Para el suelo estudiado, el cual presenta un predominio de partículas finas, la adición de materia orgánica contenida en el biosólido, probablemente permitió la formación de agregados.

Análisis químicos del suelo. Para el caso del pH, cada dosis de biosólido aplicada, ocasionó un incremento de éste. Lo cual es similar a lo registrado por Cavaleri *et al.* 2004, quienes reportaron un aumento en el pH con la aplicación de biosólidos. En el mismo estudio, se menciona que los efectos de la aplicación de biosólidos en el pH del suelo, pueden ser variables y que particularmente, dependerán del pre-tratamiento tanto del suelo como del biosólido aplicado. La variación del pH

puede deberse al desprendimiento de CO₂ y posterior conversión en H₂CO₃, a la mineralización del nitrógeno orgánico y su subsiguiente transformación en NO₃, a la presencia de cationes básicos contenidos en los residuos orgánicos, entre otros (Abad 1998).

Con la aplicación de biosólidos al suelo, se logró un aumento significativo en la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE). Los valores obtenidos con los tratamientos B1, B2 y B3, permiten clasificar la (CICE) en un nivel medio, para el primero y en un nivel alto, para los siguientes (ICA 1992). Estas condiciones son benéficas para las plantas, pues le permiten al suelo retener cationes intercambiables tales como Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, evitando que se pierdan por lixiviación (Lora 2003). Según Castro (1998), la capacidad del suelo de retener partículas positivas, depende tanto de la existencia de las arcillas como de la materia orgánica, debido a que la materia orgánica posee cargas negativas en su exterior (grupos funcionales COOH⁻ y OH⁻ principalmente), las cuales le permiten atraer los cationes.

Con respecto a los resultados de los contenidos de nutrientes, éstos pueden interpretarse de acuerdo con los rangos propuestos por el ICA 1992 y por Ortega 1997, tal como se muestra en la Tabla 6. Exceptuando el Al, puede establecerse que todos los elementos analizados se encontraron en niveles altos en los tratamientos B2 y B3 principalmente. Lo anterior puede ser perjudicial para las plantas, al afectar el proceso de absorción de nutrientes, ya

que la presencia excesiva de uno puede limitar la absorción de otro, es decir causar antagonismo (Fernández *et al.* 2001).

Además un alto contenido de nutrientes también puede ocasionar problemas de toxicidad en las plantas, tal como se explica en el aparte correspondiente al análisis de crecimiento.

Tabla 6. Interpretación de los análisis químicos del suelo para cada uno de los tratamientos de la especie *Jacaranda mimosifolia*.

Elemento	Tratamiento				Interpretación *		
	B0	B1	B2	B3	Bajo	Medio (adecuado)	Alto
Al cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	0,7	0,4	-	-	< 2	-	-
Ca cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	8,5	12,4	17,1	19,4	< 3	> 3	> 6
Mg cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	4,9	5	4,9	4,5	< 1,5	> 1,5	> 2,5
K cmol ₍₊₎ Kg ⁻¹	0,39	0,41	0,55	0,59	< 0,2	> 0,2	> 0,4
P mg kg ⁻¹	18	83	137	165	< 20	> 20	> 40
S mg kg ⁻¹	43	150	300	575	< 5	> 5	> 10
Fe mg kg ⁻¹	41	76	112	121	< 25	> 25	> 50
Mn mg kg ⁻¹	33	48	50	67	< 5	> 5	> 10
Cu mg kg ⁻¹	1	3	5	7	< 1	> 1	> 3
Zn mg kg ⁻¹	1	17	26	40	< 1,5	> 1,5	> 3
B mg kg ⁻¹	0,3	1,5	2,5	2,9	< 0,2	> 0,2	> 0,4
NO ₃ mg kg ⁻¹	-	232	286	325	50	90	120
NH ₄ mg kg ⁻¹	5	23	46	81	10	20	27

*Interpretación: corresponde al estimativo de los nutrientes del suelo. Fuente: ICA 1992, Ortega 1997.

CONCLUSIONES

La mejor respuesta en el crecimiento se obtuvo en el testigo y en el tratamiento con un 2 % de materia orgánica en el suelo, en comparación con los tratamientos con 4 % y 8 % de materia orgánica, donde se presentó una baja sobrevivencia, un menor crecimiento en altura y diámetro del tallo, número de hojas y una baja producción de biomasa.

La cantidad de nutrientes encontrada en los tratamientos B2 y B3, generó probablemente una combinación de

problemas de toxicidad, antagonismo y sinergismo, que finalmente pudieron ocasionar un desbalance nutricional con una mortalidad de plántulas superior al 50 %.

Las condiciones físicas del suelo mejoraron con el aumento en la cantidad de biosólido aplicada, evidenciándose un incremento de la estabilidad de agregados y en la retención de humedad, y una disminución de la densidad aparente y de la densidad real. Los cambios fueron evidentes en los tratamientos con mayor cantidad de biosólido (B2 y B3).

Con respecto a las propiedades químicas evaluadas: pH, carbono orgánico oxidable, Ca, Mg, K, CICE, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S, B, NO_3^- , NH_4^+ , se presentaron aumentos en los valores obtenidos para cada una de las variables con el incremento de la cantidad de biosólido aplicada en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Laboratorios de Física y Química de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando. Laboratorio de Control de Calidad Aguas de la planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando. Vivero Municipal. Ladrillera vereda El Ajizal, Municipio de Itagüí. Laboratorio de Microscopía Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Walter Osorio Vega, Director de la Escuela de Geociencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Profesores de Estadística de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Hernán Echavarría Sánchez y José Miguel Cotes Torres. Gladys Acosta y Mauricio Silva.

BIBLIOGRAFIA

Abad, M. 1998. Aprovechamiento del compost de residuos sólidos urbanos en agricultura. p. 53-66. En: Orozco, F. y Osorio, W., eds. Residuos orgánicos, aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. Medellín: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 151 p.]

Aguilera, M. 2003. Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales. Disponible en Internet. <http://146.83.41.79/Profesor/Verolagos/D01i1034/result.html>. [Consultada: Oct. 2003].

Alcañiz, J. M. 2003. Influencia de los biosólidos en el control de la erosión de suelos de canteras. p. 111-130. En: Curso Internacional de Restauración Ecológica de Canteras y Uso de Biosólidos. Memorias. (2003: Santa Fé de Bogotá). Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Barrera, L. 2003. El papel de la materia orgánica en el manejo integral de la fertilidad del suelo. p. 123-134. En: Triana, M.; Lara, R.; Gómez, M. I. y Peñaloza, G., eds. Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá D.C.: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Bennett, W. 1993. Plant nutrient utilization and diagnostic plant symptoms. p. 1-7. En: Bennett, W., ed. Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. St. Paul, Minnesota: APS Press.

Castro, H. 1998. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. Tunja, Colombia: Instituto Universitario Juan de Castellanos. 360 p.

Cavaleri, M.; Gilmore, D.; Mozaffari, M.; Rosen, C. and Halbach, T. 2004. Hybrid poplar and forest soil response to municipal and industrial by-products: a greenhouse study. En: Journal of Environmental Quality. Vol. 33, no. 3; p. 1055-1061.

Daguer, G. P. 2003. Gestión de biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre. En: Curso Internacional de Restauración Ecológica de Canteras y Uso de Biosólidos. Memorias. (2003: Santa Fé de Bogotá). Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Empresas Públicas de Medellín. 2004. Biosólidos planta San Fernando. Sin Publicar. Medellín: EPM.

Fageria, N. K.; Baligar, V. C. and Jones, C. A. 1991. Growth and mineral nutrition of field crops. New York: Marcel Dekker. 476 p.

Fernández, M.; Aguilar, M.; Carrique, J.; Tortosa, D.; García, C.; López, M. y Pérez, J. 2001. Suelo y medio ambiente en invernaderos. Andalucía, España: Consejería de Agricultura Y Pesca. 135 p.

Gamrasni, M. 1985. Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas. México: Asociación Francesa para el Estudio de las Aguas. 137 p.

García, F.; Guerrero, C.; Mataix, J.; Navarro, J.; Gómez, I. and Mataix, J. 2004. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. Disponible En Internet. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=BrowseListURL&_type=subject&subjCol=8&zone=brws&_acct=C000055778&version=1&urlVersion=0&userid=1998314&md5=8c28d49afadf6fa42113edb7584e97f5. [Consultada: Oct. 2004].

Guerra, P.; Luna, M. and Hernández, R. 2004. Aprovechamiento de biosólidos

como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. En: Tecnología Pecuaria, México. Vol. 42, no. 3; p. 379-395

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos, quinta aproximación. Bogotá: ICA. 64 p. (Manual de Asistencia Técnica No. 25.)

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2006. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 6 ed. Bogotá, D.C., Colombia: Imprenta Nacional. p. 407-410.

Lora, R. 2003. Las propiedades químicas del suelo y su fertilidad. p. 31-42. En: Triana, M. Lara, R. Gómez, M. I. y Peñaloza G., eds. Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Montenegro, H. 2003. Propiedades físicas de los suelos en relación con la fertilidad. p. 3-21. En: Triana, M. Lara, R. Gómez, M. I. y Peñaloza G., eds. Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Morgan, L. 2000. El Gran Debate: amonio Vs. nitrato. Disponible en Internet. <http://www.lamolina.edu.pe/FACULTAD/ciencias/hidroponia/boletin9.htm>. [Consultada: Mar. 2005].

Ortega, D. 1997. Fertirrigación en cultivos de flores. p. 135-147. En: Silva, F., ed. Fertirrigación. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Ramírez, P. y Pérez M. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). En: Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. Vol. 59, no. 2; p. 3543-3556.

Salisbury, F. y Ross, C. 1994. Fisiología Vegetal. México: Grupo Editorial Iberoamerica. 759 p.

Washington State Department of Ecology. 2002. Solid waste and financial assistance program. Washington: WSDE. (Publication N 93-80).