

CRECIMIENTO DE PLANTAS DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) EN UN SUELO FERRALÍTICO ROJO COMPACTADO TRATADO CON LODO DE DEPURADORA

E. Utria[✉], Inés Reynaldo, A. Cabrera y Ada Morúa

ABSTRACT. With the aim of evaluating and comparing the response of some growth components in tomato plants on a compacted Red Ferralitic soil amended with several doses of sewage sludge, this work was carried out at the National Institute of Agricultural Sciences. One experiment with two repetitions was conducted, in which an increase of plant height, stem diameter, leaf area, shoot and root dry weight, and N and P content of shoots was shown with sludge application. The content of essential elements in the soil also increased by the organic material application. In general, tomato plants responded positively to sludge application, it being more accentuated with higher doses of sludge and longer time between application and evaluations. These results demonstrate that applying sludge to agricultural production systems is an alternative for plant nutrition and the improvement of soil properties, that improve crop growth.

RESUMEN. Con el objetivo de evaluar y comparar la respuesta de algunos componentes del crecimiento en plantas de tomate, en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con varias dosis de lodo de depuradora, se realizó el presente trabajo en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Se hizo un experimento que se repitió por dos años, en los cuales los resultados mostraron un incremento de la altura de la planta, diámetro del tallo, superficie foliar, masa seca de la parte aérea y radical de las plantas, y contenido de N y P de la parte aérea de las plantas, con la aplicación de lodo. El contenido de elementos esenciales en el suelo también se incrementó con la aplicación de este material orgánico. De forma general, las plantas de tomate respondieron positivamente a la aplicación de lodo, acentuándose más esta respuesta a medida que aumentaron las dosis de lodo y el tiempo que mediaba entre su aplicación y las evaluaciones realizadas. Estos resultados demuestran que aplicar lodo en sistemas de producción agrícolas, es una alternativa para la nutrición de las plantas y el mejoramiento de las propiedades del suelo, que favorece el crecimiento de los cultivos.

Key words: sewage sludge, acrisols, growth, tomato

Palabras clave: lodos residuales, acrisoles, crecimiento, tomate

INTRODUCCIÓN

Los problemas económicos y ecológicos del mundo actual han revitalizado la idea del reciclaje eficiente de residuos agrícolas, forestales, urbanos, industriales, así como el uso de otras fuentes de materia orgánica y nutrientes, que permitan reducir el uso de los fertilizantes minerales como vía para la nutrición de las plantas.

Una de las alternativas que actualmente se viene poniendo en práctica en el mundo, es la aplicación de lodo de depuradora, un subproducto de la depuración de aguas residuales, que puede contener componentes valiosos como materia orgánica (MO) (35 y 40 %) (1), ni-

trógeno (N) (3-6%), fósforo (P) (1-5 %) y micronutrientes (2, 3, 4). El contenido de potasio (K) en estos lodos es relativamente bajo (5, 6), ya que este elemento es muy soluble y permanece en su mayor parte en las aguas una vez finalizado el proceso de depuración de estas.

De las posibles opciones para la gestión de estos residuos orgánicos, la utilización agrícola con sus distintas variantes es la más importante, ya que permite incorporar al suelo nutrientes considerados como esenciales para las plantas, y simultáneamente reducir el déficit de materia orgánica existente en ellos (7), la cual influye en el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos (8).

La materia orgánica presente en los lodos mejora la estructura, porosidad, permeabilidad y retención hídrica de los suelos (9) y disminuye su acidez potencial (10), traduciéndose este efecto en una mayor facilidad para el laboreo, mejor suministro de agua y oxígeno para las plantas y en una mejor exploración del sistema radical, que favorece su capacidad de absorción de agua y nutrientes. Además, incrementa el número de microorganismos que influyen en los ciclos biogeoquímicos de los elementos esenciales en los suelos (11).

E. Utria, Profesor Asistente del Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad Agroforestal, Centro Universitario de Guantánamo, carretera a Santiago de Cuba, km 2½, Guantánamo; Dr.C. Inés Reynaldo, Investigador Titular del Departamento de Fisiología y Bioquímica Vegetal; Dr.C. A. Cabrera, Investigador Titular del Departamento de Biofertilizantes, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, La Habana; Ada Morúa, Jefa de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), Quibú, Quivicán.

✉ eutria@inca.edu.cu

Teniendo en cuenta los aspectos referidos anteriormente, el presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar y comparar la respuesta de algunas variables relacionadas con el crecimiento de plantas de tomate, sembradas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con diferentes dosis de lodo de depuradora.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), ubicado en San José de las Lajas, provincia La Habana, en el 2001 y 2002.

El suelo utilizado se clasifica como Ferralítico Rojo compactado, según el mapa 1:25 000 de la Dirección Nacional de Suelos del MINAG y se corresponde con un Ferralítico Rojo compactado éutrico de la Nueva Versión de Clasificación de los Suelos de Cuba (12).

Los lodos de depuradora se extrajeron de la Estación Depuradora de Aguas Residuales "Quibú" de Marianao, ciudad de La Habana. Algunas de sus propiedades se presentan en el Tabla I.

Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 consistieron en la aplicación de 0, 95, 115 y 135 g lodo.kg⁻¹ suelo, respectivamente. El suelo y las mezclas suelo + lodo, luego de secados al aire, fueron pasados por un tamiz de 5 mm de diámetro. Posteriormente, el suelo y las mezclas se depositaron en macetas de seis litros de capacidad, las cuales tienen una altura de 21.5 cm, un diámetro basal de 15 cm y un diámetro superior de 21.5 cm.

Se utilizaron 15 macetas por tratamiento y en cada maceta se sembraron cinco semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) var. INCA 9-1, el 20 de noviembre del 2001 y el 28 de enero del 2002. Luego de la germinación, se dejaron tres plantas por maceta.

Las macetas se regaron cada dos días a máxima capacidad de retención de humedad, utilizando el método gravimétrico.

Evaluaciones realizadas al suelo, al lodo y a las mezclas de ambos. La materia orgánica (MO) se determinó según el método de Walkley y Black y el pH por el método potenciométrico con una relación suelo:agua de 1:2.5.

Las muestras de lodo se digirieron con una mezcla de H₂SO₄ + Se, según el método Kjeldahl y en el extracto se determinaron los contenidos totales de Ca²⁺ y Mg²⁺ por complexometría, mediante valoración con EDTA; el P por colorimetría con el desarrollo del color azul del complejo molibdofosfórico y el N según el método de Nessler.

En el caso del suelo y las mezclas suelo + lodo, se tomaron tres muestras por tratamiento al inicio del experimento en cada año, realizándose en cada una la extrac-

ción del calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺) intercambiables con la solución de NH₄OAc N a pH 7 y del P asimilable con la solución de H₂SO₄ 0.1N con una relación sustrato:solución de 1:25. Las determinaciones se realizaron por los métodos mencionados anteriormente.

Todas las técnicas analíticas utilizadas para los análisis están descritas en el Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos (13).

Evaluaciones realizadas en las plantas

- ★ número de días a los cuales se inició la manifestación de los eventos fenológicos evaluados. Las evaluaciones se realizaron a todas las plantas de los tratamientos que se encontraban presentes a la hora de efectuar las mediciones, en tres momentos o estadios del cultivo, cuando el 75 % de las plantas tratadas con lodo estaban en la fase de:
 1. Primer momento (M1): emisión de cinco hojas verdaderas
 2. Segundo momento (M2): inicio de la floración
 3. Tercer momento (M3): inicio de la fructificación
- ★ altura de la planta (cm). Las evaluaciones de altura de la planta, desde la base hasta el brote de hojas terminal del tallo principal, se realizaron cada 10 días después de la germinación (ddg). Se evaluaron 10 plantas por tratamiento
- ★ diámetro del tallo (cm). Las evaluaciones del diámetro del tallo se realizaron en su base. Se evaluaron 10 plantas por tratamiento cada 10 días
- ★ masa seca de la parte aérea y radical (g). Las evaluaciones se realizaron en los tres momentos que corresponden con los momentos o estadios fenológicos evaluados. Los tejidos se mantuvieron a una temperatura de 70 ± 5°C, hasta lograr masa constante. Se escogieron ocho plantas por tratamiento.
- ★ superficie foliar (cm²). Se determinó por el método del disco (14). Se escogieron ocho plantas por tratamiento y al igual que las evaluaciones de masa seca, las mediciones de superficie foliar se realizaron en los tres momentos fenológicos evaluados.
- ★ contenido de N y P (mg.planta⁻¹). Se escogieron cuatro plantas por tratamiento al final del experimento; luego de secas las muestras de la biomasa aérea y radical, estas se molieron y una alícuota se digirió con la mezcla de H₂SO₄ + Se, y en el extracto se determinaron el N y P total, según se describió para el análisis de lodo; posteriormente se calculó esta variable teniendo en cuenta la masa seca y los contenidos de nutrientes en los órganos evaluados, utilizando la fórmula:

$$\text{Contenido del elemento (mg.planta}^{-1}\text{)} = \frac{\text{masa seca (mg.planta}^{-1}\text{)} \cdot \% \text{ de nutrientes}}{100}$$

Tabla I. Valores promedio de algunas características de los lodos de depuradora utilizados en el experimento

Año	P (%)	Ca (%)	Mg (%)	MO (%)	Nt (%)	Relación C:N	pH (H ₂ O)
2001	1.22±0.02	6.87±0.63	0.45±0.03	44.83±0.34	2.31±0.03	11.25±0.04	7.10±0.05
2002	1.26±0.06	7.33±0.22	0.60±0.15	46.90±0.10	2.57±0.13	10.58±0.08	7.00±0.10

Contenido de P, Ca, Mg, MO, Nt, C:N y pH ± el error estándar. Nt= N total; MO= materia orgánica; C:N= relación C/N

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado. En todos los casos los resultados experimentales fueron sometidos al análisis estadístico correspondiente (ANOVA). Las comparaciones de medias se realizaron según la Dócima de Tukey para el 5 % de probabilidad de error, en los casos en que se encontraron diferencias significativas. Las docimaciones señaladas en las figuras corresponden a cada momento de evaluación. Para el análisis estadístico se utilizó el paquete estadístico STATGRAPHICS versión 4.1 en ambiente Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al efectuar la mezcla de lodo con suelo, se produjo un incremento en los contenidos de P, Ca y MO del sustrato obtenido (Tabla II). Algunos autores han encontrado que la aplicación de este residuo orgánico al suelo aumenta el contenido de Ca (15, 16, 17), MO y P (3, 18, 19), conforme a las dosis aplicadas.

Un aumento en el contenido de MO conlleva a un incremento en la cantidad de N, el cual se incorpora a la planta participando en la síntesis de aminoácidos, que posteriormente darán lugar a la formación de proteínas necesarias para el crecimiento vegetal y, en particular, el de las hojas, aumentando la superficie fotosintética de la planta. Se ha encontrado correlación entre la cantidad de nitrógeno suministrado y la superficie foliar disponible para la fotosíntesis (20).

La aplicación de este residuo orgánico no tuvo efecto sobre el contenido de Mg intercambiable en el 2001. Sin embargo, el contenido de este elemento en el 2002 se incrementó con dicha aplicación. Este comportamiento pudiera estar relacionado con el menor contenido del elemento en el lodo utilizado en el 2001. Este incremento en el último año es de vital importancia para las plantas, debido al papel estructural que tiene el Mg como componente de la molécula de clorofila y su participación en la activación de algunas enzimas, fundamentalmente en las que participan en el proceso fotosintético.

La aplicación de este material orgánico provocó que el pH tomara valores ligeramente básicos, cuando el pH del suelo fue inferior o superior al neutro. Esto concuerda con otros resultados (7), que mostraron que la aplicación de estos residuos orgánicos en el suelo, tenía un efecto corrector del pH, aspecto muy importante por la implicación que tiene en la movilidad y/o disponibilidad de los elementos esenciales en el suelo.

La aplicación de lodo no tuvo efectos sobre el proceso germinativo de las semillas; estas germinaron entre los cuatro y cinco días después de sembradas, independientemente del tratamiento impuesto. Sin embargo, tuvo un efecto marcado en las manifestaciones de los otros eventos fenológicos evaluados en el cultivo (Figura 1).

Las plantas del tratamiento control (0 g lodo.kg⁻¹ suelo) en ocasiones no lograron expresar todos los eventos fenológicos evaluados y, cuando lo hicieron, tardaron más tiempo que las de los restantes tratamientos. Por el bajo contenido de materia orgánica presente en el suelo donde crecieron estas plantas (Tabla II), se deduce que el contenido de N del cual dispusieron las plantas durante el experimento fue relativamente bajo, siendo menor en el 2001, en el cual se observó la mayor afectación, evidenciado por el menor contenido de este elemento en su parte aérea (Figura 2), el cual fue superado 8, 10 y 21 veces por los tratamientos donde se aplicaron 95, 115 y 135 g lodo.kg⁻¹ suelo, respectivamente. Comportamientos similares han sido encontrados (21, 22), donde el contenido de N en plantas de olivo se incrementó con la aplicación de lodo.

El contenido de P también fue menor en el 2001, hecho que propició un limitado contenido de este elemento en la biomasa aérea de las plantas (Figura 3). El contenido de P de las plantas del tratamiento control (0 g lodo.kg⁻¹ suelo) fue superado 11, 13 y 25 veces cuando se aplicaron 95, 115 y 135 g lodo.kg⁻¹ suelo, respectivamente. Un comportamiento similar que corrobora que el contenido de N y P aumenta en plantas cultivadas en suelos tratados con lodos, fue informado en el cultivo del maíz, la soya, la alfalfa, el sorgo (8) y la zanahoria (23).

Tabla II. Características de los tratamientos empleados al inicio del experimento

Tratamientos (g lodo.kg ⁻¹ suelo)	Características				
	P (mg.kg ⁻¹)	Ca	Mg (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	MO (%)	pH (H ₂ O)
2001					
0	48.0±2.0 b	6.27±0.13 c	0.97±0.17 ns	1.36±0.27 b	6.67±0.06 b
95	429.6±8.3 a	17.70±0.46 ab	0.77±0.09 ns	3.34±0.14 a	7.67±0.03 a
115	546.0±42.1 a	17.47±0.17 b	0.67±0.14 ns	3.73±0.14 a	7.73±0.05 a
135	537.6±37.3 a	19.17±0.43 a	0.67±0.23 ns	3.84±0.23 a	7.70±0.03 a
2002					
0	564.6±10.3 d	12.10±0.47 b	1.27±0.44 b	2.68±0.08 c	8.20±0.02 a
95	988.6±0.7 c	19.10±0.21 a	4.00±0.49 a	4.24±0.06 b	7.60±0.03 b
115	1183.3±8.3 b	20.50±1.17 a	3.97±0.82 a	4.92±0.07 a	7.50±0.03 b
135	1244.0±2.4 a	21.80±0.62 a	3.83±0.32 a	5.07±0.05 a	7.50±0.04 b

Contenido de P, Ca, Mg, MO y pH ± el error estándar

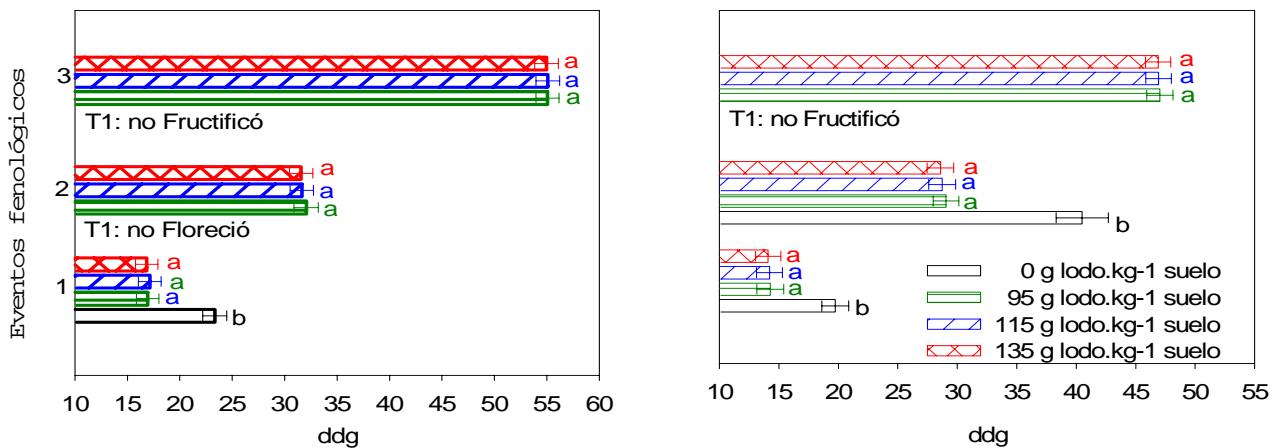


Figura 1. Días en que se iniciaron las manifestaciones de algunos eventos fenológicos en plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora. A la izquierda: 2001, a la derecha: 2002. Eventos 1: Emisión de cinco hojas verdaderas; 2: Inicio de floración y 3: Inicio de fructificación. (ddg) Días después de la germinación

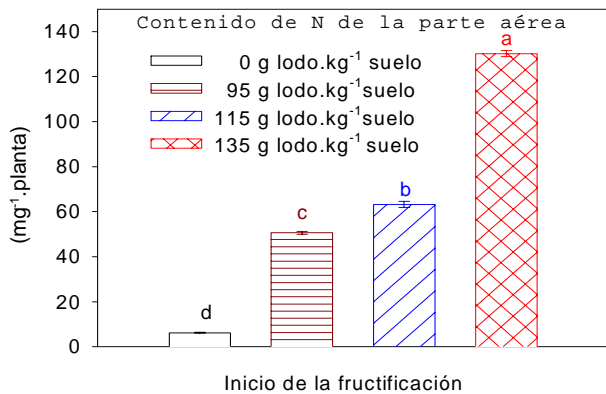


Figura 2. Contenido de N en la biomasa aérea de plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora (2001)

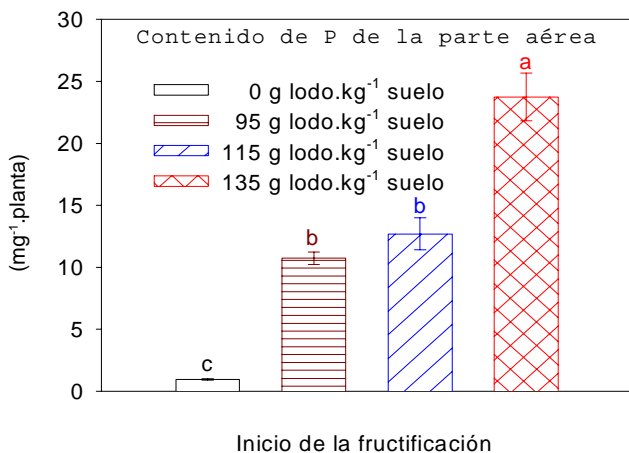


Figura 3. Contenido de P en la biomasa aérea de plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado, tratado con lodo de depuradora (2001)

Esta situación fue probablemente la causa de la afectación en el desarrollo del cultivo, debido a las implicaciones que tienen estos elementos en la síntesis del nuevo material vegetal. Dichas afectaciones fueron más pronunciadas en las plantas sembradas en el 2001, donde el contenido de materia orgánica del suelo solo fue de 1.36 % y el de fósforo, 48 mg.kg⁻¹. Unido a esto y teniendo en cuenta el efecto mejorador que tiene la materia orgánica en el suelo, se puede inferir que los efectos negativos provocados por la preparación del suelo utilizado en el experimento pudo haber afectado más intensamente las propiedades físicas del suelo en el 2001, fenómeno que propició que la evidente afectación del ciclo biológico del cultivo fuera más marcada en las plantas controles, desarrolladas en el tratamiento donde no se aplicó lodo, probablemente por la deficiente circulación del agua y el aire en el suelo y la menor capacidad de intercambio catiónico de las arcillas frente a la de los coloides orgánicos. En cambio, el comportamiento del estado fenológico de las plantas cultivadas en los tratamientos donde se aplicó lodo en ambos años se vio favorecido, debido a que estas tuvieron una mayor disponibilidad de elementos esenciales durante su desarrollo, además de que las propiedades físicas del sustrato pudieran verse mejoradas por la aplicación de estos residuos orgánicos.

Se destaca el hecho de que cuando las semillas fueron sembradas fuera de la época óptima establecida para el cultivo (2002), las plantas redujeron el tiempo para la aparición de los eventos fenológicos evaluados, debido a que estas estuvieron sometidas a condiciones climáticas diferentes a las de la fecha óptima, lo que pudo haber influido en la degradación de la materia orgánica por enzimas excretadas por algunos microorganismos del suelo, a la vez, otros microorganismos exudan al medio metabolitos que pueden ser absorbidos directamente por las plantas, alterando conjuntamente con el cambio en

las condiciones climáticas la actividad metabólica de ellas. En este sentido, se ha planteado que la época de siembra tiene un marcado efecto sobre el ciclo de los cultivos (24), ocurriendo un acortamiento en sus fases, cuando estos se siembran fuera de la fecha óptima establecida.

La aplicación de lodo de depuradora provocó incrementos en la altura de las plantas de tomate (Figura 4). En el 2001, las plantas del tratamiento donde se aplicó la mayor dosis de lodo ($135 \text{ g lodo.kg}^{-1}$ suelo) alcanzaron valores estadísticamente superiores al de los restantes tratamientos. En el 2002, en las últimas evaluaciones realizadas, los valores de altura tendieron a ser mayores, conforme al aumento de las dosis de lodo aplicadas. Resultados similares fueron notificados (25), en los que se observó que al aplicar lodo de depuradora al suelo, se producía un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de la parte aérea y radical de plantas de centeno.

Hay coincidencias en afirmar que la aplicación de lodo al suelo incrementa el crecimiento de las plantas, producto del aumento en la concentración de elementos esenciales (26).

Al evaluar el diámetro del tallo (Figura 5), se observó que, de forma general, en todas las mediciones realiza-

das, el mejor comportamiento correspondió a las plantas del tratamiento donde se aplicó la mayor dosis de lodo ($135 \text{ g lodo.kg}^{-1}$ suelo), con excepción de la evaluación realizada a los 20 ddg en el 2002, donde no existieron diferencias significativas en los valores de esta variable entre las plantas de los tratamientos en los que se aplicaron las diferentes dosis de lodo; en las demás evaluaciones las plantas de los tratamientos donde se aplicaron las menores dosis de lodo lograron valores intermedios, es decir, inferiores al de la mayor dosis aplicada, pero superior al control. Las plantas del tratamiento control (0 g lodo.kg^{-1} suelo) presentaron menores magnitudes de grosor del tallo. Otros resultados evidencian que la aplicación de lodo de depuradora influye positivamente en el crecimiento del cultivo del tomate (25).

En la Figura 6 se observa que, de forma general, la superficie foliar fue estimulada por la aplicación de lodo, donde se presentan valores superiores en las plantas cultivadas en dichos tratamientos en relación con las del control.

En el primer momento de evaluación (M1), que correspondió con la emisión de cinco hojas verdaderas en las plantas de los tratamientos donde se aplicó lodo, se

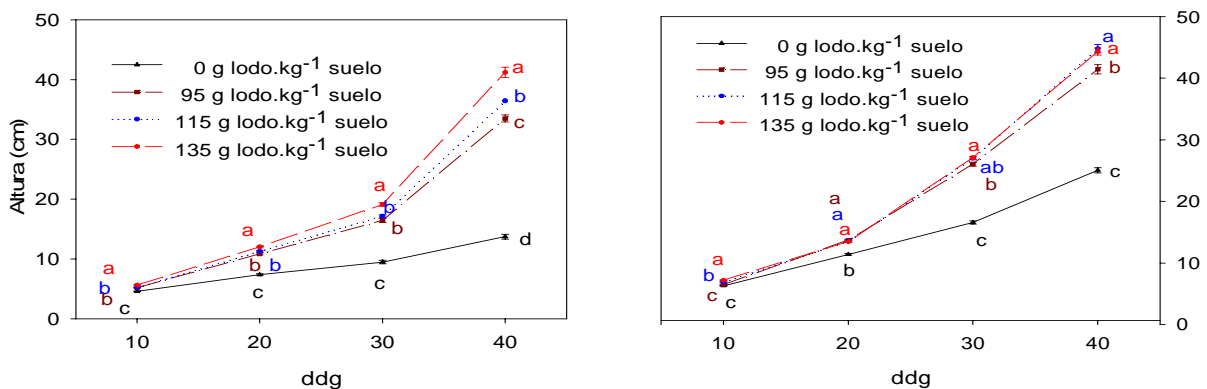


Figura 4. Dinámica de la altura de plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora. A la izquierda: 2001, a la derecha: 2002. La docimación es válida para cada momento de evaluación. (ddg) Días después de la germinación

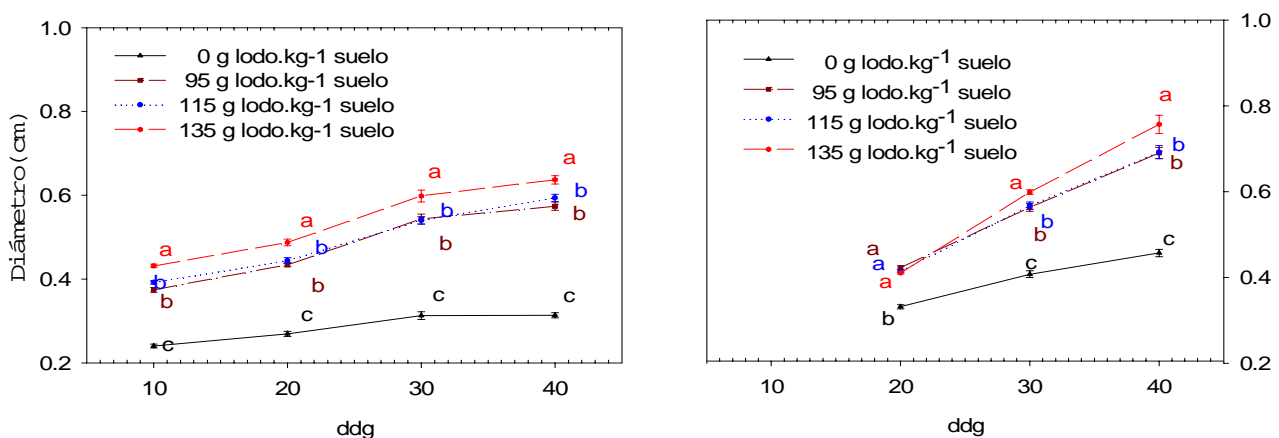


Figura 5. Dinámica del diámetro del tallo de plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora. A la izquierda: 2001, a la derecha: 2002. La docimación es válida para cada momento de evaluación. (ddg) Días después de la germinación

evidenció que en el 2001, las plantas del tratamiento donde se aplicó la mayor dosis de lodo lograron los mejores resultados. Las plantas de los dos tratamientos donde se aplicaron las menores dosis de este residuo obtuvieron valores intermedios entre el tratamiento de mayor dosis y el control. En el 2002, el efecto del lodo no fue muy marcado, ya que entre el tratamiento control y el que se aplicaron 95 y 135 g lodo.kg⁻¹ suelo no existieron diferencias significativas, ni entre los tratamientos donde se aplicaron las mayores dosis de lodo. Sin embargo, la superficie foliar de las plantas donde se aplicaron 115 g lodo.kg⁻¹ suelo fue estadísticamente superior al tratamiento que se le aplicó la menor dosis de lodo y al control.

El segundo momento de evaluación (M2) correspondió con el inicio de la floración en las plantas de los tratamientos donde se aplicó lodo. En el 2001, los valores de superficie foliar aumentaron conforme a las dosis de lodo aplicadas. Si embargo, en el 2002 no existieron diferencias significativas entre los tratamientos donde se aplicó lodo. En ambos años el tratamiento control fue superado por los restantes tratamientos.

El tercer momento de evaluación (M3) se correspondió con el inicio de la fructificación en las plantas de los tratamientos donde se aplicó lodo. En el 2001, el comportamiento fue similar a la segunda evaluación, donde los valores de superficie foliar fueron superiores en la medida que aumentaban las dosis de lodo aplicadas. En el 2002, los mejores resultados fueron para las plantas de los tratamientos donde se aplicaron las mayores dosis de estos residuos orgánicos. Las plantas del tratamiento control obtuvieron los menores resultados.

Este incremento de la superficie foliar tiene un gran significado fisiológico para el vegetal, ya que con este, se aumenta el área fotosintéticamente activa de la planta, lo cual favorece la producción de carbohidratos, que conjuntamente con el agua y los elementos minerales absorbidos por el sistema radical, el cual se ve mejorado por la aplicación de lodo (Figura 8), pueden inducir un incremento en la síntesis de proteínas, que resultará en un incremento de la biomasa del cultivo.

Al evaluar la masa seca de la parte aérea de las plantas (Figura 7), se evidenció que la respuesta de esta

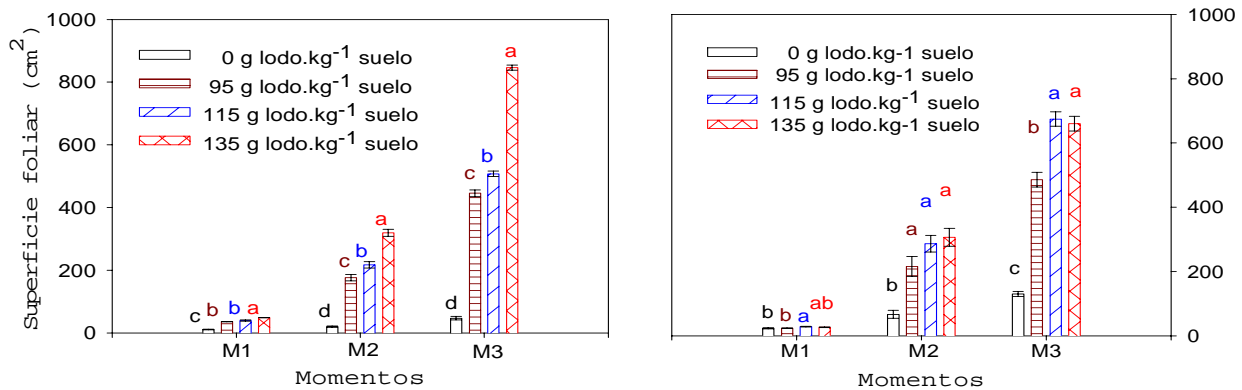


Figura 6. Dinámica de superficie foliar en plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora. A la izquierda: 2001, a la derecha: 2002. Momentos (M), cuando el 75 % de las plantas de los tratamientos donde se aplicó lodo se encontraban en la fase de: M1) Emisión de cinco hojas verdaderas, M2) Inicio de la floración y M3) Inicio de la fructificación. La docimación es válida para cada momento de evaluación

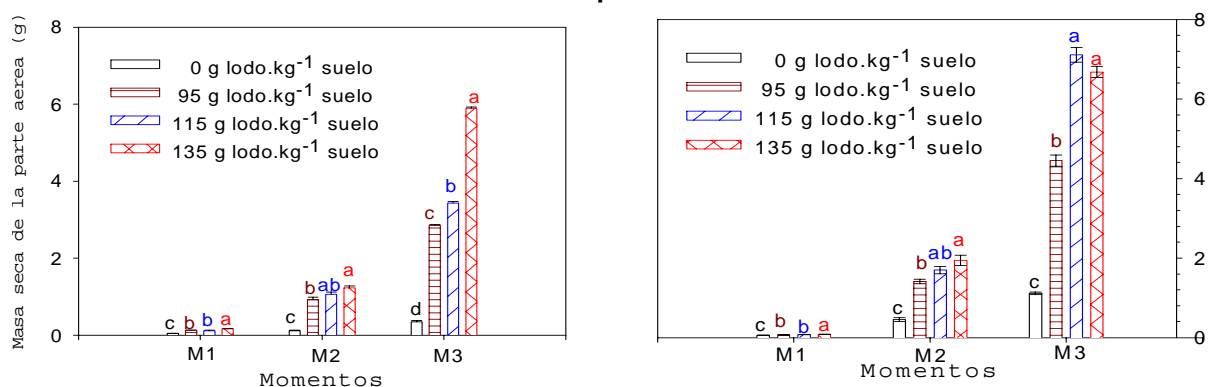


Figura 7. Dinámica de masa seca de la parte aérea de plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora. A la izquierda: 2001, a la derecha: 2002. Momentos (M), cuando el 75 % de las plantas de los tratamientos donde se aplicó lodo se encontraban en la fase de: M1) Emisión de cinco hojas verdaderas, M2) Inicio de la floración y M3) Inicio de la fructificación. La docimación es válida para cada momento de evaluación

variable en ambos años se vio favorecida por la aplicación de lodo. En todos los casos, el tratamiento control obtuvo los menores resultados.

En el primer momento, el 2001 y 2002 tuvieron comportamientos similares, donde se observó que las plantas del tratamiento a las que se aplicaron 135 g lodo.kg⁻¹ suelo, lograron valores de biomasa aérea superiores a las de los restantes tratamientos, seguidas de las plantas de los tratamientos donde se aplicaron las menores dosis de este material orgánico, donde se obtuvieron resultados superiores al del tratamiento control.

En el segundo momento, el comportamiento de esta variable fue similar en ambos años, donde se observó la tendencia a aumentar la biomasa aérea conforme a las dosis aplicadas, a pesar de que entre los tratamientos en los que se aplicaron las mayores dosis no existieron diferencias significativas, al igual que ocurrió con los tratamientos donde se aplicaron las menores dosis de lodo. Sin embargo, sí existieron diferencias entre la mayor y menor dosis aplicadas. El tratamiento control mantuvo el peor comportamiento.

En el tercer momento, a pesar de que en todos los casos las plantas del tratamiento control obtuvieron las menores magnitudes de biomasa aérea, las plantas de los tratamientos donde se aplicaron las dosis de lodo tuvieron un comportamiento diferencial. En el 2001, los valores de masa seca aérea incrementaron con el aumento de las dosis. Sin embargo, en el 2002, los tratamientos donde se aplicaron las mayores dosis de lodo superaron estadísticamente a los demás tratamientos, seguidos de las plantas del tratamiento donde se aplicaron 95 g lodo.kg⁻¹ suelo.

Resultados similares fueron encontrados en sorgo (27) y en zanahoria (23), los que concluyeron que la aplicación de lodo de depuradora incrementa significativamente la producción de biomasa de los cultivos.

La biomasa radical también se vio influida positivamente por la aplicación de lodo (Figura 8), evidenciándose que la acumulación de biomasa radical tendió a ser mayor en los tratamientos donde se aplicó este residuo, existiendo diferencias marcadas desde el primer momento de evaluación entre las plantas donde se aplicó este material orgánico.

En el primer momento, en las plantas del 2001 no se observaron diferencias muy marcadas en la producción de biomasa radical, aunque se destaca el hecho de que las plantas del tratamiento donde se aplicó la mayor dosis de lodo (135 g lodo.kg⁻¹ suelo), lograron valores superiores a los del control. En el 2002, entre las plantas de los tratamientos donde se aplicaron las diferentes dosis de lodo, no existieron diferencias significativas en cuanto a los valores de esta variable, siendo superiores a los del tratamiento control.

En el segundo momento, en el 2001 la mayor producción de biomasa radical fue obtenida por las plantas de los tratamientos donde se aplicaron 115 y 135 g lodo.kg⁻¹ suelo. Sin embargo, en el 2002 no existieron diferencias significativas entre los tratamientos tratados con lodo.

En el tercer momento, el comportamiento fue similar en ambos años. Los mejores resultados se obtuvieron con la aplicación de la mayor dosis de lodo; las plantas de los tratamientos donde se aplicaron las menores dosis lograron menores valores de biomasa radical que las del tratamiento donde se aplicó la dosis superior, pero mayor que las del tratamiento control.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que en la medida que aumenta la edad del cultivo, lógicamente incrementa la producción de biomasa del sistema radical, pero se puede evidenciar que ese incremento es mayor en los tratamientos donde se aplicó lodo, a la vez que aumentan las diferencias entre las plantas controles y las sometidas a los diferentes tratamientos con lodo.

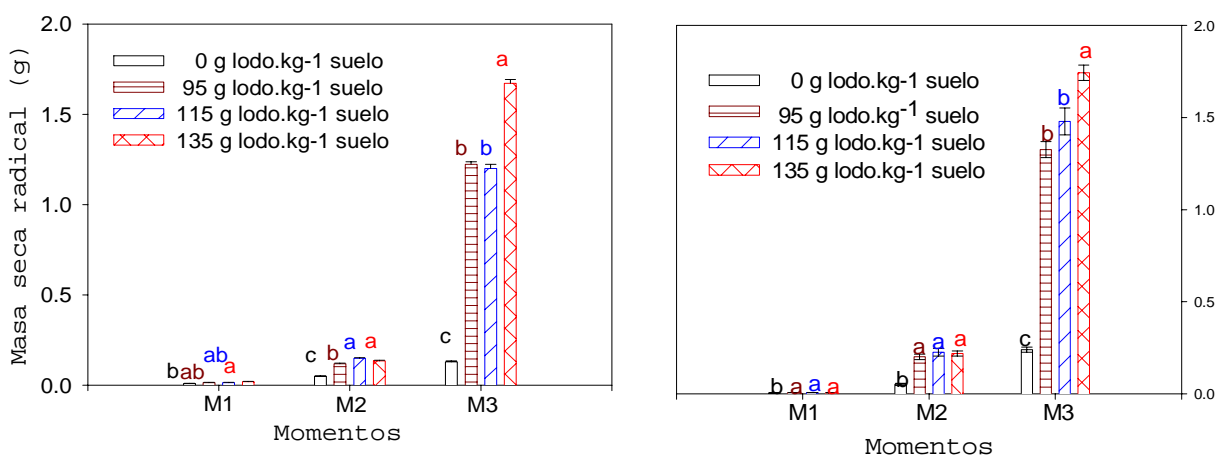


Figura 8. Dinámica de la masa seca radical de plantas de tomate, cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo compactado tratado con lodo de depuradora. A la izquierda: 2001, a la derecha: 2002. Momentos (M), cuando el 75 % de las plantas de los tratamientos donde se aplicó lodo se encontraban en la fase de: M1) Emisión de cinco hojas verdaderas, M2) Inicio de la floración y M3) Inicio de la fructificación. La docimación es válida para cada momento de evaluación

Resultados similares fueron informados en plantas de trigo (25) y se observó que la aplicación de lodo estimulaba el sistema radical de este cultivo.

Los resultados hasta aquí discutidos indican que existe una relación estrecha entre el nivel de fertilidad del sustrato y el requerimiento de la dosis de lodo. En general, se apreció que en el 2002, las dosis mayores de lodo tuvieron un efecto similar sobre las variables evaluadas, con excepción del diámetro del tallo y la masa seca radical; sin embargo, en el 2001, fue con la dosis mayor que se lograron los mayores efectos de la aplicación de este material orgánico.

El incremento de la superficie foliar, la masa seca de la parte aérea de las plantas y la masa seca radical, fueron mayores en el período que media entre la segunda y la tercera evaluación. Se destaca el hecho de que en el caso de los tratamientos donde se aplicó lodo, las plantas se encontraban en la fase de mayor demanda de nutrientes del cultivo (floración-fructificación), debido a que en esta etapa el cultivo sintetiza mayor cantidad de materia seca. Lo anterior sugiere que en esta fase del cultivo, la disponibilidad de nutrientes en los tratamientos donde se aplicó lodo era suficiente para suplir los requerimientos del cultivo.

El comportamiento de las variables estudiadas y las diferencias observadas entre las plantas cultivadas en los tratamientos donde se aplicó lodo de depuradora y suelo, estuvieron influidas por el estado fenológico, en el cual se encontraban estas en los momentos de efectuar las evaluaciones (Figura 1).

La respuesta del crecimiento de las plantas de tomate a la disposición de lodo de depuradora, se debe a que los elementos esenciales aportados por este material orgánico, los cuales en gran medida se encuentran en forma orgánica (fundamentalmente N y P), son degradados secuencialmente por la acción de las poblaciones de microorganismos del suelo, garantizando que la incorporación de estos elementos sea simultánea a la absorción por el cultivo, a la vez que reduce las pérdidas por drenaje o lixiviación (28).

Estos lodos, además de macronutrientes, contienen micronutrientes que desde el punto de vista fisiológico tienen gran importancia, ya que actúan como activadores de muchas enzimas esenciales para la vida vegetal (20).

Esta respuesta del crecimiento también pudo estar influida por las mejoras que se producen en las propiedades físicas y biológicas de los suelos, producto del aporte de materia orgánica procedente de los lodos (29). Esta influye positivamente en la formación y estabilidad de los agregados, mejorando, a su vez, la porosidad, disminuyendo la resistencia de las partículas del suelo a la penetración de raíces y favoreciendo el movimiento de gases y el balance hídrico en el suelo. Esta última propiedad es de vital importancia para la raíz y la planta en general, ya que una adecuada disponibilidad del agua puede resultar en un incremento en la permeabilidad celular de la raíz y disminuir de esta forma su resistencia al flujo de agua y

nutrientes hacia el interior de ella, garantizando que estos elementos puedan ser absorbidos por el vegetal y participen en los diferentes procesos metabólicos llevados a cabo en ellas.

Todo esto favorece la capacidad de intercambio catiónico de los suelos (3), producto del incremento que se produce en el contenido de humus de estos, lo cual garantizará un mayor contenido de elementos en la solución del suelo, que podrán ser absorbidos por las plantas.

REFERENCIAS

1. Delgado, M.; Porcel, M. A.; Miralles, R.; Bellido, N.; Bigeriego, M.; Beltrán, E. y Calvo, R. Mineralización de nitrógeno procedente de residuos orgánicos. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 1999, vol 15. no. 1, p. 19-25.
2. Barbarick, K. A. y Hipólito, J. A. Termination of sewage biosolid application affects wheat yield and other agronomic characteristics. *Agronomy Journal*, 2003, vol. 95, p. 1288-1294.
3. Andrade, M. L.; Marcet, P.; Reyzaal, M. L. y Montero, M. J. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en suelo tratado con lodo de residuales urbanos. *Edafología*, 2000, vol. 7, no. 3, p. 21-29.
4. Delgado, M.; Miralles, R.; Porcel, M. A.; Beltrán, E. M.; Beringola, L.; Martín J. V. y Bigeriego, M. Ensayo sobre el efecto como fertilizantes del compost de lodo y del RSU, para su empleo en la forestación de tierra agrarias. *Montes*, 2002, vol. 67, p. 54-58.
5. Gorbanov, S.; Panajotova, G.; Rachovsky, G. y Gorbanova, A. Influence of fertilizing with biological sludge from sewage on agrochemical characteristics of Smolnitza and the productivity of cotton-plants. En: *International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate (6th : 1999 jul. 4-9 : Barcelona)*. Extended abstracts. Barcelona : Universitat, 1999. p. 253-255.
6. Shober, A. L.; Stehouwer, R. C. y Macneal, K. E. On-Farm assessment of biosolid effects on soil and crop tissue quality. *Journal of Environmental Quality*, 2003, vol. 32, no. 5, p. 1873-1880.
7. Da Silva, F. C.; Boareto, A. E.; Berton, R.; Bazaglia, H.; Peixe, C. A. y Mendoça, E. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado con cana-açúcar. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2001, vol. 35, no. 5, p. 831-840.
8. Skousen J. y Clinger, C. Sewage sludge land application program in West Virginia. *Soil and Water*, 2003, vol 48, no 2, p. 17-22.
9. Illera, V.; Walter, I. y Cala, V. Niveles de metales pesados en *Thymus zygia* desarrollados en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 2001 vol. 17, no 4, p 170-186.
10. Oliveira, C.; Marques V.; Mazur, N.; Velloso, A. y Amaral, S. Efecto de la aplicación de lodo de desagüe urbano enriquecido Co Cd, Pb, Zn en el cultivo del arroz. En: *World Congress of Soil Science (16 : 1998 : Montpellier)*. Montpellier , 1998.
11. Mavridou, A.; Kouloubis, P.; Vassalou, E.; Rigas, F.; Vakalis N. Microbial quality of sewage sludge in Greece disposed for agriculture use. *International Journal of Environmental Health Research*, 2001. vol. 11, no 3, p. 275-280.

12. Cuba. Minagri. Instituto de Suelos. Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Instituto de Suelos. Ministerio de la Agricultura. La Habana : AGRINFOR, 1999. 64 p.
13. Paneque, V.M. /et al./ Manual de técnicas analíticas de suelo, foliar, abono orgánico y fertilizantes químicos del INCA. En: Encuentro Provincial de Agricultura Orgánica (2002 : La Habana). INCA, 2002.
14. Watson, D. S. The physiological basis of variation in yield. *Advances in Agronomy*, 1953, vol. 4, p. 101-145.
15. Pasqualoto, L.; Santos, G.; Rumjanek, V. M.; Morales, A. y Guridi, F. Distribuição da materia orgânica e características de ácidos húmicos em solos com adição resíduos de origen urbana. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2001. vol. 36, no. 12, p. 1529-1538.
16. Penn, C. J. y Sims J. T. Phosphorus forms in biosolid-amended soil and losses in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 2002, vol. 31, no 4, p. 1349-1361.
17. Keller, C.; McGrath, S. P. y Dunham S. J. Trace metal leaching through a soil-grassland system after sewage sludge application. *Journal of Environmental Quality*, 2002, vol. 31, no. 5, p. 1550-1560.
18. Delgado, M. M.; Poncel, M. A.; Miralles, R.; Beltrán, E. M.; Beringola, L. y Martín J. V. Sewage sludge compost fertilizer effect on maize yield and soil heavy metal concentration. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 2002, vol. 18, no. 3, p. 147-150.
19. Siddique, M. y Robinson, S. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 2003, vol. 32, no. 3, p. 1114-1121.
20. Hernández, R. Nutrición mineral de las plantas. En: Libro de Botánica On line, 2001. [Consultado 20/11/04]. Disponible en: <<http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/>>
21. Miralles R.; Beltrán, E.; Porcel, M. A.; Beringola, M. L.; Martín, J. V.; Calvo, R. y Delgado, M. M. Influencia de tres tipos de lodo de estaciones depuradoras en el desarrollo de estaquillas de olivo. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 2002, vol. 14, no. 4, p. 163-169.
22. Gascó, G.; Martínez, M. J.; Alonso, J.; Vicente, M. A. y Lobo, M. C. Utilización agrícola de lodo de depuradoras: Aplicación al olivar madrileño. *Boletín Agrario*, 2001, vol. 30, p. 31-35.
23. Martínez, F.; Cuevas, G.; Calvo, R.; y Walter, I. Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem. *Journal of Environmental Quality*, 2003, vol. 32, no. 2, p. 472-479.
24. Verde, G. Ciclo biológico y fases fenológicas en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). [Tesis de Maestría]; UNAH, 2000
25. Miralles, R.; Beltrán, E.; Porcel, M. A.; Delgado, M.; Beringola, M. L.; Valero, J.; Calvo, R. y Walter, I. Emergencia de seis cultivos tratados con lodo, fresco y compostado, de estaciones depuradoras. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 2002, vol. 18, no. 3, p. 139-146.
26. Maclaren, R. G.; Clucas, L. M.; Taylor, M. D. y Hendry, T. Leaching of macronutrients and metals from undisturbed soil treated with metal-spiked sewage sludge. 1. Leaching of macronutrients. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, vol. 41, no. 3, p. 571-588.
27. Al-Jaloud, A. Effect of sewage sludge on germination, growth and biomass yield of Sorghum in calcareous soil. *Journal of Biological Science*, 1999, vol. 2, no. 2, p. 494-497.
28. Andrade, M. L.; Quintero, M.; Reyzaabal, M. L. y Estévez, J. Composición de materia orgánica y determinación de metales en lodo para su uso potencial como enmendantes de suelo. *Revista Información Tecnológica*, 1999, vol.10, no. 6, p. 79-88.
29. Illera, V.; Walter, I.; Souza, P. y Cala, V. Short-term of biosolid and municipal solid waste application on heavy metal distribution in a degraded soil under a semi-arid environmental. *The Science of the Total Environmental*, 2000, vol. 255, p. 29-44.

Recibido: 22 de enero del 2003

Aceptado: 2 de julio del 2004