

Los Biosólidos de Aguas Residuales Urbanas en el Contenido de Metales Pesados en un Suelo Cultivado de Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill)

The Biosolids in the Heavy Metals Content in Cultivated Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) Soil

BORGES, Enio U.¹; ESCOBAR, Inés M. R.²; RODRÍGUEZ, Juan Adriano C.³; GUEVARA, Donaldo M.⁴; SÁNCHEZ, Sandra G.⁵

¹Facultad Agroforestal de Montañas, Centro Universitario de Guantánamo (FAM/CUG), Cuba, eutria@fam.cug.co.cu ; ²Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), Cuba, ines@inca.edu.cu; ³INCA, Cuba, nani@inca.edu.cu; ⁴INCA, Cuba, dmorales@inca.edu.cu; ⁵FAM/CUG, Cuba, goffe@fam.cug.co.cu.

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el impacto de la aplicación de biosólidos de aguas residuales urbanas en la concentración de metales pesados (MP) en el sistema suelo-planta y la composición microbiológica del suelo, se realizó el presente trabajo en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), La Habana, Cuba. La aplicación de biosólidos en el suelo Ferralítico Rojo compactado incrementó el contenido cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn) en los sustratos; mientras que, el contenido de hierro (Fe) y manganeso (Mn) disminuyó, comportamiento que mantuvo la misma tendencia al evaluar los diferentes órganos de las plantas. Se destaca que las concentraciones de MP encontradas en los sustratos y los órganos vegetales no representaron riesgos de fitotoxicidad ya que fueron inferiores a los niveles considerados como máximos permisibles para este tipo de suelo y para las plantas de tomate.

PALABRAS CLAVES: Ferralítico Rojo, propiedades químicas, frutos de tomate.

ABSTRACT

With the aim of evaluating the impact of land application of biosolids on heavy metal concentration in the soil-plant system and soil microbiological composition, this work was carried out in the National Institute of Agricultural Sciences, La Havana, Cuba. The application the biosolids in a compacted Red Ferralitic soil increased copper (Cu), nickel (Ni) and zinc (Zn) content in the substrate, while iron (Fe) and manganese (Mn) content was diminished, behaviour that maintained the same tendency when evaluating different organs of the plants. The concentrations of heavy metal in the substrate and in vegetable organs did not represent fitotoxic risks since they were inferior to the levels considered as maximum allowed for the soil type and for tomato plants.

KEY WORDS: Red ferralitic, chemical properties, tomato fruit.

Correspondências para: Dr C. Enio Utria Borges, eutria@fam.cug.co.cu
Aceito para publicação em 23/09/2008

INTRODUCCIÓN

Las regulaciones realizadas por varios países con el objetivo de proteger el ambiente de la contaminación a establecido como regla elemental la depuración de las aguas residuales antes de ser vertidas a los cauces receptores, generando en este proceso de depuración elevadas cantidades de residuos orgánicos llamados lodos de depuradoras, biosólidos o fangos (MIRALLES *et al.*, 2002). El volumen de producción de estos residuos es un grave problema en ciudades muy pobladas y su gestión se hace cada vez más urgente a medida que la población aumentan (DELGADO *et al.*, 2002).

En Cuba, existen siete Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), con una producción anual estimada de 9.600 toneladas (ROVIROSA, 2005, comunicación personal). Si bien por ahora, los volúmenes de biosólidos no son tan significativos, en un futuro cuando se terminen y entren en funcionamiento las plantas de los ríos Luyanó y Martín Pérez, además de otras inversiones previstas dentro del programa de recuperación de la Bahía de La Habana, sólo en la capital podrían generarse entre 10.000 y 15.000 toneladas anuales (PELÁEZ, 2003).

En nuestro país se han hecho pocos estudios encaminados a determinar cual es el uso más apropiado para la evacuación de estos residuos; sin embargo, a escala internacional la utilización agrícola con sus distintas variantes es la más adecuada, por ser éstos residuos una fuente potencial de materia orgánica (MO) y elementos nutrientes considerados como esenciales para las plantas (NASCIMENTO; BARROS; MELO, 2004). Además, con esta práctica se disminuye el peligro que representan estos residuos como contaminantes del ambiente y se aprovecha un recurso de bajo costo, que además de mejorar las características químicas de los suelos, también mejoran sus características físicas y biológicas

(SELIVANOVSKAYA *et al.*, 2001).

La mejoras que proporcionan la aplicación de biosólidos al suelo incrementa la producción de biomasa y el rendimiento de los cultivos (COGGER *et al.*, 2001); sin embargo, dicha aplicación presenta algunos aspectos negativos; tales como, la presencia de metales pesados (MP) y microorganismos patógenos, siendo la presencia de MP su principal factor limitante.

Entre estos MP existen algunos como el Cu, Zn, Ni, Fe y Mn que son elementos esenciales para las plantas y su deficiencia afecta el comportamiento de las mismas; mientras que, si se encuentran en exceso implican riesgos de fitotoxicidad (MARTINS *et al.*, 2003; PASSOS *et al.*, 2004). Existen otros como el Pb, As, Hg y Cd que no tienen funciones fisiológicas reconocidas y su presencia en el suelo siempre será un riesgo potencial de contaminación, ya que pueden acumularse y contaminar los suelos (ANJOS; MATTIAZZO, 2001), las aguas y los alimentos (KELLER *et al.*, 2002).

Para el desarrollo de esta investigación se escogió el cultivo del tomate porque además de ser este un cultivo ampliamente establecido a escala internacional y que en Cuba (FAO 2005), es ampliamente utilizado como planta indicadora debido a que es exigente a niveles de nutrición mineral apropiados (HERNÁNDEZ; CHAILLOUX, 2001) y de la presencia de niveles de MP relativamente altos en los suelos, fundamentalmente Ni y Cu (FABISZEWSKI *et al.*, 1987; MARRERO, 2005).

Teniendo en cuenta lo planteado con anterioridad y la problemática que implica la acumulación y disposición inadecuadas de biosólidos en el suelo, se propuso como objetivo de este trabajo evaluar la influencia de la aplicación de biosólidos en la concentración de metales pesados en un sistema suelo Ferralítico Rojo cultivado de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS.

El trabajo se desarrolló en el área central del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), ubicado en el municipio San José de las Lajas de la provincia de La Habana, Cuba. El suelo utilizado se clasifica como Ferralítico Rojo compactado eútrico (HERNÁNDEZ et al., 1999).

Los biosólidos utilizados procedieron de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) "Quibú" del municipio Marianao, Ciudad de La Habana. Los mismos son obtenidos mediante un proceso de digestión anaeróbica y su producción varía de 413,39 – 521,26 toneladas anuales. La procedencia de estos residuos es fundamentalmente de origen residencial y sus niveles de metales pesados (MP) se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por las normas de ecología mexicana (NOM-004-ECOL-2001) y el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación 1990 de España (REAL DECRETO 1310/1990) para su uso agrícola. Sus características se presentan en la **Tabla 1**

Previo a este trabajo investigativo se realizó un experimento en el cual se evaluó la respuesta del desarrollo vegetativo de plantas de tomate a la aplicación de diferentes dosis de biosólidos,

donde se observaron los mejores resultados en las plantas desarrolladas en el suelo tratado con 135 y 150 g biosólidos por kg^{-1} de suelo, de estas dosis se decidió seleccionar para la realización del presente trabajo las de menor tasa (135 g biosólidos por kg^{-1} de suelo) y se aplicó al suelo con diferentes frecuencias.

Para esto se estableció un diseño completamente aleatorizado y se llevó a cabo un experimento durante tres años (2002, 2003 y 2004) en canteros de hormigón de 2,55 m de largo por 0,64 m de ancho y 0,80 m de altura. En el primer año, para la realización de la investigación se utilizó suelo de la capa superficial (0 - 20 cm), secado al aire y tamizado con una malla de 5 mm de diámetro y los biosólidos fueron molinados y tamizados por una malla de 2 mm. Para la preparación de las mezclas de suelo con biosólidos al inicio de cada año, el suelo fue depositado en una plataforma de cemento y se le adicionó la cantidad de biosólidos necesaria para formular las dosis deseadas, posteriormente se voltearon varias veces para homogenizarlas, en el segundo y tercero los biosólidos se dispusieron sobre el suelo y se procedió a incorporarlos manualmente. La fertilización mineral en el primer

Tabla 1. Características químicas de los biosólidos estudiados.

Indicador	Media	Intervalo de Confianza	Indicador	Media	Intervalo de Confianza
MO, %	42,35	39,34 - 45,36	Fe, %	2,09	1,99 - 2,19
Ca ²⁺	Total (%)	7,3 - 10,38	Cu, mg.kg ⁻¹	337,67	332,5 – 342,84
N			Zn, mg.kg ⁻¹	135,0	61,82 – 208,18
P			Cr, mg.kg ⁻¹	79,37	68,76 – 89,98
Mg ²⁺			Ni, mg.kg ⁻¹	59,5	52,98 – 66,02
K ⁺			Mn, mg.kg ⁻¹	55,67	54,24 – 57,10
pH	7,12	6,99-7,25	Co, mg.kg ⁻¹	18,83	16,66-21,00
Relación C/N	10/1	8/1 – 14/1	Pb, mg.kg ⁻¹	< L.D	-

L.D: Límite de detección.

Los biosólidos de aguas residuales urbanas

año de experimentación se realizó sólo a base de urea (46% de N), teniendo en cuenta que los contenidos de P y K en el suelo eran adecuados (PANEQUE, 2005, comunicación personal). En los dos años restantes la fertilización nitrogenada, fosfórica y potásica se realizó con urea, superfosfato triple (46 % de P_2O_5) y cloruro de potasio (62 % de K_2O) respectivamente, de acuerdo con lo que establece el Instructivo Técnico del Minagri (1990) y en todos los casos se aplicó fraccionadamente, tomando como criterio lo planteado por Gómez *et al.*, (2000).

Las semillas de tomate variedad INCA 9(1) fueron sembradas a un marco de plantación de 0,50 m entre hileras por 0,30 m entre plantas, para un total de 18 plantas por cantero, se utilizaron dos canteros por tratamiento. Los tratamientos estudiados se presentan en la **Tabla 2**.

Para la determinación de los contenidos totales de Ca, Mg, P, N y K de los biosólidos de aguas residuales urbanas, se realizó una digestión con una mezcla de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y selenio (Se), según el método Kjeldahl y en el extracto se determinaron los contenidos de Ca y Mg por volumetría, mediante valoración con EDTA, el P por el método colorimétrico, mediante el desarrollo del color azul del complejo molibdofosfórico a longitud de onda de 660 nm, el N por colorimetría con el reactivo de Nessler a longitud de onda de 440 nm y el K por fotometría de llama, comparado con la emisión producida por las soluciones patrones.

La MO oxidable se determinó según el método descrito por Walkley y Black y se expresaron los resultados en porcentajes de materia orgánica oxidable y el pH por el método potenciométrico con una relación sólido: agua de 1:2,5.

Para los análisis de los contenidos totales de MP (Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, Mn, Co y Pb) del suelo y los sustratos se tomaron tres muestras por tratamiento y las determinaciones se realizaron mediante espectrometría de Absorción Atómica, con previa extracción con una mezcla de ácidos: H_2SO_4 18N, perclórico ($HClO_4$), fluorhídrico (HF) al 48% y clorhídrico (HCl) 6N, según la metodología descrita por Muñiz (2000) en el caso del suelo y de sus mezclas con biosólidos y para el caso de los biosólidos y los órganos vegetales se realizó una digestión previa con agua regia (ácido nítrico (HNO_3):HCl, 1:3) (AOAC, 1997). Los resultados fueron expresados en porcentajes para los metales que se encontraron en mayor concentración en el sustrato y los de menores concentraciones en mg del elemento por kg de masa seca.

En todos los casos los resultados experimentales fueron sometidos a Análisis de Varianza según el diseño experimental empleado y se comprobó previamente la normalidad de los datos por la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la homogeneidad de varianza por la prueba de Bartlett. En los casos en que se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, las comparaciones de medias se realizaron según la Dócima de Tukey para el 5% de probabilidad

Tabla 2. Tratamientos estudiados en el experimento.

Tratamientos	Descripción
S	Suelo natural (los tres años de experimentación)
F	Suelo tratado con fertilizante mineral (los tres años de experimentación)
B₁₃₅ Primer	135 g biosólidos.kg ⁻¹ de suelo, aplicado sólo el primer año (año 1)
B₁₃₅ Alternos	135 g biosólidos.kg ⁻¹ de suelo, aplicado en años alternos (años 1 y 3)
B₁₃₅ Consecutivos	135 g biosólidos.kg ⁻¹ de suelo, aplicado tres años consecutivos

del error. Para el análisis estadístico fue utilizado el paquete estadístico STATGRAPHICS Versión 5.0 y para realizar los gráficos el programa SigmaPlot versión 6, ambos en ambiente Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Al hacer un análisis del contenido de MP en los sustratos se evidenció que las magnitudes de los mismos se encuentran en un orden decreciente en el suelo natural y el tratado con fertilizante mineral: Fe > Mn > Cu > Zn > Ni > Co > Cr > Pb; sin embargo, cuando se aplicaron biosólidos, independientemente de la frecuencia, hubo un cambio en el orden entre el Zn y el Cu, manteniéndose los restantes de igual forma (**Tabla 3**), lo que evidencia que las aplicaciones de biosólidos no sólo influyeron en la cantidad de MP en los sustratos, sino en su frecuencia de aparición, esto indica el impacto que tiene la aplicación de estos residuos en el suelo, los cuales en algunos casos pueden ser tan contaminantes que alteran la composición original

de los sustratos en los cuales las plantas se desarrollan. En este sentido, Illera *et al.* (2001) encontraron que la aplicación de biosólidos en un suelo Leptosoles Rendscicos cambió las secuencias de concentraciones de MP en la capa superficial del mismo.

De forma general, las aplicaciones de biosólidos con diferentes frecuencias no incrementaron las concentraciones de MP en los sustratos, hasta niveles que constituyen un riesgo potencial de toxicidad para las plantas, ya que los contenidos totales de estos elementos no sobrepasan los niveles considerados como críticos por Muñiz (2000) para estos tipos de suelos (Ni, 1100 mg.kg⁻¹; Pb, 350 mg.kg⁻¹; Cu, 600 mg.kg⁻¹ y Zn, 600 mg.kg⁻¹); sin embargo, es de señalar que el nivel de Zn acumulado durante las tres aplicaciones consecutivas de biosólidos al suelo, constituye el 85,55% de la concentración considerada como crítica por exceso para este tipo de suelo, lo cual representa una alerta acerca de la aplicación de estos biosólidos con una mayor frecuencia en este tipo de suelo para ser cultivado de tomate.

Tabla 3. Niveles totales de metales pesados en un suelo Ferralítico Rojo compactado cútrico tratado con diferentes frecuencias de aplicación de biosólidos (en base seca).

Metales pesados		Tratamientos				
		S	F	B _{135 Primer}	B _{135 Alternos}	B _{135 Consecutivos}
Fe	(%)	8,61±0,03 a	8,83±0,08 a	7,96±0,03 b	7,06±0,06 c	6,36±0,09 d
Mn		0,40±0,003 a	0,40±0,01 a	0,36±0,006 b	0,32±0,003 c	0,26±0,006 d
Zn	(mg.kg ⁻¹)	76,67±3,33 c	70,0±5,77 c	306,67±136,79 h	316,67±17,61 b	513,33±3,33 a
Cu		87,67±3,18 d	84,0±2,89 d	146,67±3,33 c	173,33±3,33 h	226,67±3,33 a
Ni		44,0±1,53 h	47,67±1,76 h	58,33±1,76 a	57,67±1,45 a	62,67±2,60 a
Co		46,67±3,33 b	53,33±3,33 a	44,33±3,33 b	44,33±3,33 b	44,33±3,33 b
Cr		17,0±1,0 ns	19,33±1,77 ns	16,33±0,88 ns	14,33±0,33 ns	16,67±0,88 ns
Pb		< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Niveles medios de MP ± el error estándar. LD: Límites de Detección (10 mg.kg⁻¹). S, *suelo natural*; F, *suelo tratado con fertilizante mineral* y B_{135 Primer}, *135 g biosólidos.kg⁻¹ de suelo aplicado sólo el primer año*; B_{135 Alternos}, *135 g biosólidos.kg⁻¹ de suelo aplicado en años alternos* y B_{135 Consecutivos}, *135 g biosólidos.kg⁻¹ de suelo aplicado tres años consecutivos*.

Estos resultados corrobora lo planteado por Passos *et al.* (2004), quienes informaron que los biosólidos provenientes de tratamientos de residuales predominantemente domésticos presentan bajos contenidos de MP, dentro los que se destacan el Cu, Ni, Zn, Pb, Mn, Fe y el Cr.

Se señala, que a diferencia de los niveles de Cu, Zn y Ni, las cuales fueron incrementados en los sustratos como consecuencia de su concentración en los biosólidos, los contenidos de Fe y Mn fueron mayores en el suelo natural y el tratado con fertilizante mineral y disminuyeron conforme al aumento de las frecuencias de aplicación de biosólidos (B135 Primer > B135 Alternos > B135 Consecutivos). La mayor concentración observada en el suelo natural y el tratado con fertilizante mineral se debe a los mayores niveles de éstos elementos en el material que le da origen a los suelos Ferralíticos Rojos.

Sin embargo, cuando se aplicó biosólidos al suelo el contenido relativamente alto de MO aportado por estos residuos, pudo propiciar la formación de quelatos, ya que según Jordão *et al.*

(1993), citado por Ferreira (2000) la MO presenta en su composición sustancias húmicas que poseen grupos funcionales con excepcional reactividad para acomplejar metales (carboxilos, hidroxilos, fenólicos y de varios tipos), los cuales pueden favorecer la formación de compuestos organo-minerales con movilidad relativamente alta que pueden ser lavados por el agua de riego, provocando una disminución de sus concentraciones en la capa más superficial del suelo.

Los resultados de los niveles de MP en frutos de las plantas de tomate cultivadas en sustratos con diferentes frecuencias de aplicación de biosólidos se presentan en la (Tabla 4). En general los biosólidos, independientemente de la frecuencia de aplicación, no contribuyeron a la acumulación de metales pesados en los frutos ya que en la mayoría de los elementos analizados no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Por el contrario, los contenidos de Fe y Mn disminuyeron, tendencia observada al evaluar estos dos elementos en los sustratos donde se desarrollaron las plantas.

Tabla 4. Niveles de metales pesados en frutos de tomate, de plantas desarrolladas en un suelo tratado con diferentes frecuencias de aplicación de biosólidos (mg.kg⁻¹ muestra seca), después de tres años de experimentación.

Metales Pesados	Tratamientos				
	S	F	B _{135 Primer}	B _{135 Alternos}	B _{135 Consecutivos}
Fe	310,00-56,72 a	110,00-40,82 b	127,50-12,50 b	150,00-12,91 b	182,50-14,93 b
Mn	38,00-5,42 a	29,25-3,40 ab	26,00-0,58 ab	25,75-0,63 ab	21,98+0,72 b
Zn	20,00-1,01 ns	20,00-1,01 ns	20,00-1,01 ns	20,00-1,01 ns	20,00-1,01 ns
Cu	10,00-1,00 ns	10,00-1,00 ns	10,00-1,00 ns	10,00-1,00 ns	10,00-1,00 ns
Ni	4,33-0,77 ns	5,13-0,55 ns	4,45-0,41 ns	4,00-0,31 ns	5,08-0,49 ns
Co	5,93+0,41 ns	5,38+1,16 ns	4,93+1,02 ns	2,85-0,43 ns	4,73-0,15 ns
Cr	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Niveles medios de MP ± error estándar. LD: Límite de Detección (5 mg.kg⁻¹). S, suelo natural; F, suelo tratado con fertilizante mineral y B_{135 Primer}, 135 g biosólidos.kg⁻¹ de suelo aplicado sólo el primer año; B_{135 Alternos}, 135 g biosólidos.kg⁻¹ de suelo aplicado en años alternos y B_{135 Consecutivos}, 135 g biosólidos.kg⁻¹ de suelo aplicado tres años consecutivos.

Se destaca el hecho, que los contenidos de MO aportados por los biosólidos y a los mecanismos desarrollados por la planta frente a la presencia de determinados metales en los suelos.

Al hacer una comparación entre los niveles de metales en los órganos de las plantas de tomate cultivadas en el suelo donde se aplicó biosólidos por tres años consecutivos (**Tabla 5**), se pudo observar que en comparación a los niveles presentes en los sustratos, la movilidad hacia los órganos de las plantas fue reducida. En las plantas, la mayor acumulación de estos elementos se encontraron en la parte vegetativa (raíz, tallo y hojas), con una mayor tendencia a acumularse en la raíz y las hojas y la menor concentración se evidenció en los frutos. Este comportamiento es de vital importancia ya que precisamente es el fruto, el órgano de consumo para el hombre y de la calidad del mismo depende su salud. En este sentido, Singh *et al.* (2002) informaron de la baja movilidad de algunos metales pesados (Fe, Mn, Ni, Co y Zn) desde los diferentes órganos vegetativos de las plantas de tomate hacia los frutos.

Se destaca, que a pesar que los niveles

totales de MP en los sustratos tiene valores relativamente altos, la absorción por las plantas fue reducida, lo que evidencia que a pesar de los factores que pudieron afectar la disponibilidad y absorción de los mismos en los sustratos, las plantas son capaces de desarrollar varios mecanismos frente a la presencia de estos elementos en el ambiente. Entre ellos, los MP pueden ser absorbidos en cantidades muy pequeñas, aunque su concentración en el medio sea muy elevada. Una vez extraídos del sustrato, dentro de la planta pueden tener diferentes destinos, es frecuente que los metales pueden quedar en el apoplasto de las raíces de las plantas, así algunas plantas los acumulan en las paredes celulares y evitan de esta forma su presencia en el interior de las células.

De forma complementaria, pueden existir sistemas activos de extrusión de metales. Muy a menudo se encuentra una compartimentación, por lo que ocurre en las vacuolas un enmascaramiento de los mismos con agentes acomplejantes (aminoácidos, ácidos carboxílicos, malatos, citratos, oxalatos), según informó Jordan (2001), o los pasan al apoplasto.

Por los resultados observados se puede

Tabla 5. Niveles totales de metales pesados en un suelo Ferralítico Rojo tratado con biosólidos de aguas residuales urbanas por tres años consecutivos y su acumulación en los órganos de las plantas de tomate.

Metales pesados	Sustrato	Órganos			
		Raíz	Tallo	Hojas	Frutos
Fe	63600-900	2500,0-57,7 a	283,33-38,44 c	780,00+56,27 b	182,50+14,93 c
Mn	2600-60	91,33+2,73 a	89,67-3,33 a	88,25-8,11 a	21,98+0,72 b
Zn	513,33-3,33	119,60-12,87 ab	202,67-15,50 a	104,18+11,7 b	33,90+1,70 c
Cu	226,67-3,33	22,50-0,55 ab	16,80+1,46 bc	25,73-2,46 a	13,35+0,39 c
Ni	62,67+2,60	6,63+0,13 ns	11,73+3,55 ns	11,70+1,97 ns	5,08+0,49 ns
Co	33,33+3,33	3,67+0,32 bc	3,07+0,47 c	6,98+0,43 a	4,73+0,15 b
Cr	16,67+0,88	6,17+0,15 ns	4,17-1,09 ns	7,35-1,35 ns	< LD
Pb	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD

Niveles medios de MP \pm el error estándar. LD: Límite de Detección (5 mg.kg⁻¹).

deducir la existencia de un posible mecanismo de absorción en las plantas de tomate, el cual es selectivo, lo que permite la absorción y acumulación de algunos metales pesados en la raíz; sin embargo, otros quedan retenidos mayoritariamente en los órganos vegetativos, tal es el caso del Fe, frente al cual las plantas mostraron un mecanismo de exclusión, hecho que propició su elevada acumulación en la raíz, en comparación con los restantes órganos del vegetal. El comportamiento observado puede deberse a la presencia de determinados transportadores y/o ATPasas específicas a nivel de las membranas, los cuales son diferencialmente selectivos en el transporte de los diferentes elementos metálicos hacia el interior de las plantas.

La acumulación de los MP mayoritariamente en la raíz y las hojas se debe a que; el primero, es el órgano de contacto inmediato con los elementos del suelo y de absorción por parte de las plantas, dentro de ellos los MP; mientras que, el segundo es el órgano por el cual se produce la mayor pérdida de agua de la planta, mediante el proceso de transpiración, y después que el MP pasa a las tejidos conductores pueden moverse con el agua, la cual se mueve pasivamente por estos conductos hasta su salida a la atmósfera. Además, en las hojas se realizan una serie de reacciones bioquímicas y procesos fisiológicos vitales para el adecuado desarrollo de las plantas, en los cuales los metales pesados se encuentran formando parte estructural o como activadores enzimáticos en la síntesis de clorofilas, proteínas, ácidos nucleicos, además participan en el intercambio gaseoso, la fotosíntesis, la respiración y la asimilación del nitrógeno, del azufre, entre otros.

De forma general, se observó que las concentraciones de MP en todos los órganos de

la planta (raíz, tallo, hojas y frutos) estuvieron por debajo de los niveles considerados como críticos por exceso o potencialmente tóxicos informados por García *et al.* (2000) y además su absorción por las raíces y su posterior traslocación dentro del vegetal fue limitada. Este comportamiento pudo deberse a que los niveles de estos MP en los sustratos donde se desarrollaron las plantas se mantuvieron por debajo de los niveles considerados como críticos informados por Muñiz (2000) para este tipo de suelo, tal como fue planteado con anterioridad, además de la poca movilidad de estos elementos en los sustratos con valores de pH cercanos y superiores a la neutralidad, los cuales en pH alcalino se precipitan como hidróxidos, carbonatos, sulfatos y fosfatos, tal como fue informado por Hernández *et al.* (2005) y a los contenidos relativamente altos de MO, Ca y P presentes en los biosólidos y a la propiedad de la MO para acomplejar metales que pueden mejorar la absorción por las plantas (quelatos), pero a su vez, pueden ser trasladados con mayor facilidad hacia el subsuelo. Sumado a esto, la baja movilidad y/o disponibilidad, así como la absorción de estos metales por las plantas desarrolladas en este tipo de suelo, también pudo estar influenciada por los contenidos relativamente altos de óxidos de Fe, Al y Mn, debido a la formación litogénica del mismo, los cuales en altos valores de pH se precipitan con los MP (MORENO, 2003).

CONCLUSIONES

1. La aplicación de biosólidos por tres años consecutivos con dosis de hasta 135 g.kg^{-1} de suelo, incrementa los contenidos de Cu, Ni y Zn hasta niveles inferiores a los límites considerados como máximos permisibles en estos tipos de suelos, no altera los contenidos de Co, Cr y Pb y disminuye las concentraciones de Fe y Mn.

2. A pesar de las concentraciones de metales pesados relativamente elevadas en los sustratos, las plantas de tomate absorben cantidades relativamente pequeñas e inferiores a las concentraciones consideradas como críticas por exceso, las cuales se acumulan mayoritariamente en los órganos vegetativos.

3. La aplicación de biosólidos durante tres años consecutivos influye positivamente en las poblaciones de microorganismos encargadas de la degradación de la materia orgánica y los ciclos de los nutrientes en los sustratos; mientras que, la población de microorganismos patógenos fue mínima y en algunos casos nula.

BIBLIOGRAFIA

- ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. Extratores para Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb e Zn em latossolos tratados com biossólido e cultivado com milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 337 – 344 2001.
- AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMIST. **Official Methods of Analysis** (Cunniff, Ed.) 16 ed. VI II, Gaithersburg, Maryland. 1997
- COGGER, C. G.; BARY, A. I.; FRANSEN, S. C.; SULLIVAN, D. M. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue. **J. Environ. Qual.**, v. 30, p. 2188 – 2194, 2001.
- CUBA. MINAGRI. **Carta Tecnológica del cultivo del tomate**. 1990.
- DELGADO, M. M.; PORCEL, M. A.; MIRALLES, R.; BELTRÁN E. M.; BERINGOLA, L.; MARTÍN, J. V. Sewage sludge compost fertilizer effect on Maize yield and soil heavy metal concentration. **Rev. Int. Contam. Ambient.**, v. 18, n. 3, p. 147 – 150, 2002.
- FABISZEWSKI, J.; BREJ, T.; BIELECKI, K. Plant reactions as indicators of air pollution in the vicinity of a copper smelter. **Acta Soc. Bot. Pol.**, v. 56, n. 2, p. 353 - 363, 1987.
- FAO. **FAOSTAT DATABASE QUERY**, 2005, [Consultado 4/2/2006]. Disponible en: <http://faostat.fao.org/faostat/form?collection=Production.Crops.Primary&Domain=Production&servlet=1&hasbulk=&version=ext&language=ES>
- FERREIRA, W. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do governador e da penha no estado do Rio de Janeiro**. [Tesis de Maestría]; Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, Brasilíia, 2000, 89 p. Tese (Maestro)
- GARCÍA, J. F.; AMARAL, N. M. B. Do.; Belloso, A. C. Contaminação da microbacia de Caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesq. Agropec. Bras. Brasília**, v. 35, n. 7, p. 1289 – 1303, 2000.
- GÓMEZ, O.; CASANOVA, A.; LATERROT, H.; ANAIS, G. **Mejora genética y manejo del cultivo del tomate para la producción en el caribe**. Eds R. C. Alvarezesar y W. Calderón, 2000, 159 p.
- HERNÁNDEZ et al., **Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba**. La Habana. AGRINFOR, 1999, 64 p.
- HERNÁNDEZ, M. I.; CHAILLOUX, M. La nutrición mineral y la biofertilización en el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). **Temas de Ciencia y Tecnología**, v. 15, n. 3, p. 11-27, 2001.
- HERNÁNDEZ, R. Nutrición mineral de las plantas. 2001. En: **Libro de Botánica** [on line.]. [Consultado 26/9/2005]. Disponible en: <<http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/>>.
- ILLERA, V.; WALTER, I.; CALA, V. Niveles de metales pesados en *Thymus zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. **Rev. Int. Contam. Ambient.**, vol. 17, no. 4, p. 170 – 186, 2001.
- JORDAN, M. Adaptaciones de plantas a estres abiotico que les permiten vivir y prosperar en diferentes condiciones ambientales, **Revista Creces**, 15p, 2001.
- KELLER, C.; MCGRATH, S. P.; DUNHAM, S. J. Trace metal leaching through a soil-Grassland System after sewage sludge application. **J. Environ. Qual.**, v. 31, n. 5, p. 1550 – 1560, 2002.
- MARRERO, O. **Efecto de productos naturales en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. Var. Amalia) crecidas en un medio contaminado con cobre**. 2005. 44 p. Trabajo de (Diploma)]. Universidad Agraria de la Habana. Cuba.
- MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A. Corn yield and uptake of Cu, Fe, Mn and Zn from sewage sludge-amended soil with and without liming. **Rev. Bras. Ciênc.**

- Solo**, v. 27, n. 3, p. 563 – 574, 2003.
- MIRALLES R.; BELTRÁN, E.; PORCEL, M. A.; BERINGOLA, M. L.; MARTÍN, J. V.; CALVO, R.; DELGADO, M. M. Influencia de tres tipos de biosólidos de estaciones depuradoras en el desarrollo de estaquillas de olivo. **Rev. Int. Contam. Ambient.**, v. 14, n. 4, p. 163-169, 2002.
- MORENO, A. M. Biosolids conditioning and the availability of Cu and Zn for Rice. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 1, p. 161 – 166, 2003.
- MUÑOZ, O. **Informe de salida del proyecto: Contaminación por metales pesados en algunos de los principales agroecosistemas cubanos. Metodología para la determinación de la contaminación por metales pesados en algunos de los principales suelos cubanos. PNCT Producción de alimentos por métodos sostenibles.** Proyecto 00200042, 2000, MINAGRI. Instituto de Suelos. Dirección Provincial de Suelos la René – Habana. 10 p.
- NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C. Soil chemical alterations and growth of maize and bean plants after sewage sludge application. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 28, n. 2, p. 385 – 392, 2004.
- NOM-004-ECOL-2001. **Norma Oficial Mexicana, Protección ambiental; lodos y biosólidos; especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.** SEMARNAT. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de febrero de 2002.
- PANEQUE, V. M. Comunicación personal. 2005. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. La Habana.
- PASSOS, O. J.; SILVA, C. A.; WAGNER BETTIOL, W.; GUIMARÃES, L. R.; DYNIA, J. F. Acúmulo de Cu, Mn, Ni, Pb E Zn em latossolo vermelho adubado com fontes de lodo de esgoto e cultivado com milho. **Ciênc. Agrotec.** Lavras, v. 28, n. 1, p. 15 – 23, 2004.
- PELÁEZ, O. Cruzada ambiental con lombricultura. Granma. Órgano Oficial del Comité Central del Partido Comunista de Cuba. 27 de junio de 2003.
- REAL DECRETO 1310/1990, de 29 de octubre (1990/26490 Real decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por la que se regula la utilización de los Lodos de depuración en el sector agrario). **BOE 263/1990 de 01-11-1190**, pág. 32339. Mo de Agricultura Pesca y Alimentación.
- ROVIROSA, N. Comunicación personal. Jefe de proyecto de la DIP Almendares, 2005, Ciudad de La Habana
- SELIVANOVSKAYA, S. Y.; LATYPOVA, V. Z.; KIYAMOVA, S. N.; ALIMOVA, F. K. Use of microbial parameters to access treatment methods of municipal sewage sludge applied to grey forest soils of Tatarstan. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 86, p. 145 – 153, 2001.
- SINGH, S.; SINHA, S.; SAXENA, R.; PANDEY, K. Translocation of metals and its effects in the tomato plants grown on various amendments of tannery waste: evidence for involvement of antioxidants. **Chemosphere**, v. 57, n 2, p. 91 – 99, 2002.