

## Evaluación del contenido de metales pesados en lodos residuales aerobios

Hendrina García<sup>1</sup>, Maziad El Zauahre<sup>1</sup>, Yudith Acosta<sup>1</sup>, Héctor Morán<sup>3</sup>,  
Ligia Toyo<sup>1</sup> y Nola Fernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Investigación y Servicios Ambientales (LISA) "Dr. Humberto Fernández Morán. Universidad del Zulia. Núcleo Punto Fijo. Punto Fijo, Estado Falcón, Venezuela.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA). Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela.

<sup>3</sup> Laboratorio de Análisis Químico. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Núcleo Los Perozos. Santa Ana de Coro, Estado Falcón, Venezuela.

### Resumen

El contenido total de metales pesados en lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas servidas, fue evaluado empleando diferentes técnicas de digestión. La concentración de Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn se determinó mediante digestiones abiertas en plancha de calentamiento, cerradas en bombas tipo Parr, incineración a 550°C y 400°C y digestión en horno microondas. En todos los casos se emplearon cinco soluciones ácidas distintas: HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>-HCl, HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Los resultados mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre las técnicas y entre las soluciones digestoras. La incineración/acidificación a 400°C y la técnica de digestión cerrada permitieron obtener las concentraciones más altas en Cd ( $6,80 \pm 0,46$  mg/kg), Cu ( $782,54 \pm 45,47$  mg/kg), Ni ( $76,77 \pm 6,27$  y  $76,46 \pm 16,42$  mg/kg), Zn ( $4411,33 \pm 476,94$  mg/kg), Pb ( $304,29 \pm 9,93$  mg/kg) y Cr ( $158,31 \pm 13,84$  y  $157,01 \pm 20,53$  mg/kg). La digestión abierta y la incineración/acidificación a 550°C obtuvieron las concentraciones más bajas de Cd ( $1,66 \pm 0,30$  mg/kg), Cu ( $3,80 \pm 0,55$  mg/kg), Ni ( $7,28 \pm 2,15$  mg/kg), Zn ( $29,41 \pm 2,78$  mg/kg), Pb ( $25,23 \pm 2,08$  mg/kg) y Cr ( $3,61 \pm 0,44$  mg/kg). Al comparar los valores obtenidos, en el caso de los metales considerados potencialmente tóxicos, con las concentraciones límite establecidas por las normas de la Comunidad Europea y la Agencia de Protección Ambiental norteamericana (EPA), se observó que en su mayor parte estas no superan tales valores. La potencial utilización de estos lodos con fines agrícolas es posible controlando las dosis y frecuencia de aplicación.

**Palabras clave:** Lodos residuales, metales pesados, técnicas de digestión.

# Evaluation of the Heavy Metals Content in Aerobics Sewage Sludge

## Abstract

The total content of heavy metals in sewage sludge coming from sewage water treatment was evaluated through several softening techniques. The concentration of Cd, Cu, Cr, Ni, Pb and Zn was determined through open softening in a heating plate, closed in Parr Pumps, incineration at 550°C and 400°C and microwave digestion. In all cases five different acid-softening solutions were used: HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>-HCl, HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> and HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The results obtained showed significant differences ( $p \leq 0.05$ ) among the techniques and among the softening solutions. The incineration/acidification of the samples at 400°C and the closed softening technique procured the highest concentrations of Cd ( $6.80 \pm 0.46$  mg/kg), Cu ( $782.54 \pm 45.47$  mg/kg), Ni ( $76.77 \pm 6.27$  y  $76.46 \pm 16.42$  mg/kg), Zn ( $4411.33 \pm 476.94$  mg/kg), Pb ( $304.29 \pm 9.93$  mg/kg) and Cr ( $158.31 \pm 13.84$  y  $157.01 \pm 20.53$  mg/kg). The open softening and the incineration/acidification at 550°C procured the lowest concentrations of Cd ( $1.66 \pm 0.30$  mg/kg), Cu ( $3.80 \pm 0.55$  mg/kg), Ni ( $7.28 \pm 2.15$  mg/kg), Zn ( $29.41 \pm 2.78$  mg/kg), Pb ( $25.23 \pm 2.08$  mg/kg) y Cr ( $3.61 \pm 0.44$  mg/kg). When comparing the obtained values, in the case of the metals considered potentially toxic, with the limit concentrations established by the European Community and the American Environmental Protection Agency (EPA), it was observed that for the most part of these do not exceed such values. Potential use of this sludge with agricultural purpose is possible if there is a control of the dose and frequency of application.

**Key words:** Sewage sludge, heavy metals, softening techniques.

## Introducción

Para Uribe et al. (2000) los biosólidos o lodos residuales son materiales orgánicos ricos en nutrimentos, derivados del tratamiento de las aguas residuales, los cuales al ser estabilizados mediante procesos biológicos, físicos o químicos y cumplir con un estricto criterio de calidad, pueden ser aplicados como enmiendas sobre los suelos. Por su parte Fresquez et al (1990) establece que una forma de reciclar benéficamente estos materiales es mediante su utilización en la agricultura, lo que permite reducir el uso de fertilizantes químicos comerciales, ofrecer la oportunidad de proveer N a bajo costo para los cultivos y también suministrar otros nutrientes a los suelos, en especial a los de tipo calcáreo del desierto como: fósforo, hierro, zinc y cobre disponibles para las plantas.

En los últimos años se ha incrementado el interés por la recuperación de suelos mediante prácticas sustentables en

el tiempo, donde la adición de biosólidos orgánicos aparece como una alternativa viable, puesto que son sólidos ricos en materia orgánica con contenidos suficientes de nitrógeno y fósforo que los hace potencialmente útiles como fertilizantes y como fuente de materia orgánica. Además, según Celis et al (2006) pueden mejorar las propiedades físicas del suelo como la densidad aparente, la estructura, porosidad y retención de agua, lo cual puede reflejarse en un incremento en el rendimiento de los cultivos junto a los beneficios del uso de los lodos, también deben considerarse los riesgos que representan estos materiales, ya que cada material es diferente y puede contener altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos para los cultivos o para los consumidores de los productos de los mismos, como son los metales pesados. Otero et al (1996) la posibilidad de contaminar suelos y aguas subterráneas constituye su principal limitante, de ahí que su uso no pue-

de ser indiscriminado sin una adecuada planeación y supervisión.

Cuando los lodos residuales son manejados en forma inadecuada, pueden constituir un riesgo a la salud (As, Cd, Hg, Pb, Se, y Zn), a los cultivos (Cu, Ni, y Zn), y a los ecosistemas del suelo y agua (N, P), llegando incluso a contaminar los suelos con patógenos. Según Ahumada et al (2004) se sabe que la materia orgánica y otros componentes aportados al suelo por los lodos pueden modificar la distribución y movilidad de metales pesados, lo que podría afectar principalmente la asimilabilidad de ciertos elementos como Cu y Zn. Banks (2004) opina que numerosos estudios han abordado el problema de los metales pesados al usar lodos municipales, existiendo unanimidad entre la comunidad científica respecto al carácter tóxico de los mismos para los seres vivos, ya que afectan a las cadenas alimenticias, provocando un efecto de bioacumulación entre los organismos de la cadena trófica.

Lo antes planteado, hace necesaria la aplicación al suelo de este tipo de enmienda orgánico-mineral de un modo controlado y desde el conocimiento de todas las variables que puedan intervenir en el sistema; es necesario considerar las restricciones ambientales, la aptitud de los suelos y, fundamentalmente, previo a la aplicación de los biosólidos, llevar a cabo análisis de laboratorio bajo estrictas condiciones de control y empleando técnicas analíticas estandarizadas, que permitan determinar la concentración total de los metales pesados presentes en el lodo por ser este un valor muy útil como índice global de contaminación. La realización de este tipo de análisis implica la utilización de las técnicas de digestión en medio ácido como una manera de desintegrar la materia orgánica que puede estar complejada y de esta forma disponer de un metal libre de interferencias cuya concentración sea fácilmente determinada por espectrometría. Al respecto, existen diferentes técnicas de digestión (abiertas, cerradas, por incineración, entre otras) así como también una gran variedad de soluciones que proporcionan el medio ácido necesario para digerir diversidad de muestras.

Entre las soluciones más empleadas se encuentra el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), el cual puede ser utilizado conjuntamente con otros ácidos como ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ), ácido fluorhídrico (HF), entre otros, con la finalidad de garantizar una digestión más completa. Sin embargo, la selección, tanto de las técnicas de digestión como de las soluciones ácidas, queda a discreción del investigador. Por todo lo antes planteado, y tomando en cuenta que el análisis del contenido total

de metales pesados en un lodo residual que pudiera ser aplicado en un suelo con fines agrícolas, es un parámetro confiable de su potencial peligrosidad, se estableció como objetivo de esta investigación evaluar el contenido de metales pesados en lodos residuales aerobios.

## Materiales y Métodos

Se tomaron muestras sencillas al azar de lodos residuales aerobios procedentes de los lechos de secado de la planta de tratamiento de aguas servidas (TAS) del Complejo Refinador Paraguaná-Cardón, ubicada entre la Comunidad Cardón y Punta Cardón, municipio Carirubana del estado Falcón, la cual trata aguas residuales domésticas provenientes de las poblaciones de Punto Fijo y Carirubana, Punta Cardón y Comunidad Cardón. Estas muestras fueron mezcladas y estabilizadas en un lecho experimental dispuesto en las instalaciones del Núcleo LUZ Punto Fijo, dando lugar a una gran muestra compuesta, de la cual una vez homogeneizada y tamizada a través de una malla de 2 mm, se tomaron tres sub-muestras, a las que se les practicaron los respectivos análisis por triplicado.

En la Tabla 1 se resumen las diferentes técnicas de digestión que fueron evaluadas y en el filtrado resultante de cada proceso, se determinó el contenido total de los metales pesados: Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, mediante espectrometría de absorción atómica por llama (APHA *et al.*, 1992).

Cada una de las soluciones ácidas digestoras empleadas en los diferentes procesos de digestión fueron designados como tratamientos de la siguiente manera: T1= Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ); T2= Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ )/ ácido clorhídrico (HCl) 3:1; T3= Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ )/ ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 3:1; T4= Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ )/ ácido perclórico ( $\text{HClO}_4$ ) 1:1 y T5= Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ )/ peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 1:1.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), aplicando específicamente la Prueba Duncan de Múltiples Rangos, con un nivel de confianza de 95% y un nivel de significancia de 5%. El paquete estadístico empleado fue el Infoestat/Profesional versión 1,1. (UNC, 1999).

## Resultados y Discusión

### 1. Evaluación del Contenido de Cadmio (Cd)

En la Tabla 2, se observa que las menores concentraciones del elemento se determinaron a partir de las digestiones abiertas. En el caso de las incineraciones, tanto a 550°C como a 400°C, se determinaron valores de Cd dife-

Tabla 1. Resumen de las técnicas de digestión empleadas en la determinación del contenido de metales pesados en lodos residuales procedentes de lechos de secado.

Digestión	Procedimiento	Referencia
Abierta en Plancha de Calentamiento	10 g de muestra + 50 mL de H <sub>2</sub> O destilada + 3 mL de solución ácida (Ebullición lenta hasta volumen mínimo) 2 mL de solución ácida + 20 mL de H <sub>2</sub> O destilada (Calentamiento hasta completar la digestión)	APHA <i>et al.</i> (1992)
Cerrada en Reactor de Alta Presión (Bomba Parr)	0,5 g de muestra + 2 mL de la solución ácida + 3 mL de H <sub>2</sub> O destilada (En estufa a 105°C durante 4 horas)	Bernas (1968)
Incineración/ Acidificación a 550°C	2 g de muestra contenida en crisol se colocó en la mufla a 550±25°C durante 3 horas hasta pesada constante (ceniza blancuzca). ±1 g de ceniza + 3 mL solución ácida	Akrivos <i>et al.</i> (2000)
Incineración/ Acidificación a 400°C (Modificado)	2 g de muestra contenida en crisol se colocó en la mufla a 400±25°C durante 3 horas hasta pesada constante (ceniza blancuzca). ±1 g de ceniza + 3 mL solución ácida	Akrivos <i>et al.</i> (2000)
Asistida por horno microondas (modificada).	±1 g de muestra seca + 5 mL de solución ácida + 10 mL de H <sub>2</sub> O destilada (Calentamiento en microondas durante 40 min aproximadamente a diferentes potencias)	USEPA (1994)

Fuente: Elaboración Propia.

rentes, siendo más altos los obtenidos a menor temperatura. No obstante, el mayor interés se dirige hacia la digestión cerrada, por generar los valores de concentración media más elevados, obteniéndose el valor más alto a partir de T4 y T3 y diferenciándose significativamente del resto de tratamientos, esto debido posiblemente a que esta técnica evita la pérdida de elementos volátiles, caso contrario a lo que tiende a ocurrir en la digestión en plancha de calentamiento (Robards *et al.*, 1991). Sin embargo, muy próximo a estos valores se encuentra el obtenido a partir de T4 en la digestión asistida por microondas ( $6,32 \pm 0,83$ ), lo cual hace suponer que esta técnica con la solución ácida HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> pudiera resultar tan eficiente como las otras al eliminar adecuadamente las interferencias de la materia orgánica en las muestras.

Una concentración de Cd (7 mg/kg) similar a la máxima determinada en esta investigación fue obtenida por Ayuso *et al.* (1996) al utilizar la solución ácida compuesta por HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>. Para Romero (2002) el cadmio, conjuntamente con el mercurio y el plomo son, en general, tóxicos y reciben gran atención por ser elementos que se magnifican biológicamente en el medio natural a través de la cadena alimenticia. Alloway y Jacson (1995) afirman que, este elemento se caracteriza tener una gran movilidad y asimilabilidad por parte de las plantas. Estudios realizados sobre el comportamiento del Cd en el suelo indican que la tendencia de este metal es de permanecer en la parte superficial, lo cual, según Puga *et al.* (2006) puede representar un mayor peligro para la población y la contaminación de aguas superficiales.

Tabla 2. Valores de las medias y la desviación estándar correspondientes a la concentración de Cadmio (n = 9).

Digestión	Ácido	Medias $\pm$ s (mg/kg)	Valores máximos y mínimos
A	T5	1,66 $\pm$ 0,30 a	2,00 – 0,99
A	T3	2,32 $\pm$ 0,24 b	2,49 – 1,99
A	T1	2,51 $\pm$ 0,27 b	2,98 – 1,99
A	T2	2,95 $\pm$ 0,27 c	3,49 – 2,48
A	T4	3,42 $\pm$ 0,38 d	3,98 – 1,99
I550°	T4	4,42 $\pm$ 0,14 e	4,63 – 4,25
I400°	T3	4,61 $\pm$ 0,31 ef	4,99 – 4,14
M	T5	4,66 $\pm$ 0,38 ef	5,10 – 3,89
I550°	T2	4,81 $\pm$ 0,59 fg	5,00 – 2,44
M	T3	4,95 $\pm$ 0,83 fgh	6,90 – 4,00
I550°	T1	4,96 $\pm$ 0,07 fgh	5,00 – 4,69
I550°	T5	4,99 $\pm$ 0,01 fghi	5,00 – 4,98
I550°	T3	4,99 $\pm$ 0,01 fghi	5,00 – 4,98
I400°	T5	5,14 $\pm$ 0,13 ghi	5,34 – 4,87
I400°	T1	5,23 $\pm$ 0,23 hij	5,50 – 4,49
I400°	T4	5,31 $\pm$ 0,15 hijk	5,69 – 5,16
I400°	T2	5,35 $\pm$ 0,10 ijk	5,50 – 5,15
M	T2	5,53 $\pm$ 0,82 jkl	6,87 – 4,55
C	T5	5,64 $\pm$ 0,43 kl	6,35 – 5,30
C	T1	5,66 $\pm$ 0,52 kl	7,22 – 5,35
M	T1	5,69 $\pm$ 0,63 kl	6,54 – 4,69
C	T2	5,85 $\pm$ 0,46 l	6,35 – 5,29
M	T4	6,32 $\pm$ 0,83 m	7,20 – 4,96
C	T3	6,58 $\pm$ 0,52 m	7,26 – 5,41
C	T4	6,80 $\pm$ 0,46 n	7,25 – 6,27

Letras distintas indican diferencias significativas (p 0,05). A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°C= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas.

## 2. Evaluación del Contenido de Cobre (Cu)

La comparación entre las diferentes concentraciones obtenidas del elemento Cu (Tabla 3), permite distinguir que los valores máximos se presentan, principalmente, en los tratamientos basados en la incineración/acidificación de las muestras a 400°C excepto para el caso del T5 con el cual se determinó una concentración de  $18,84 \pm 5,48$ , valor que conjuntamente con los obtenidos por digestión abierta a partir de T5, T2, T1 y T4, constituyen las concentraciones más bajas de Cu. Considerando los valores de concentración más altos obtenidos incinerando las muestras a 400°C, se observa el siguiente orden creciente de concentración: T2 < T1 < T4 < T3. El análisis de varianza indicó diferencias muy significativas entre estos tratamientos excepto en-

tre T1 y T4, los cuales aparentemente, tienden a ser muy similares entre sí, en cuanto a su capacidad digestora.

En concordancia con Apha et al (1992) se afirma que el ácido nítrico concentrado digiere la mayoría de las muestras en forma adecuada, lo cual se evidencia en el comportamiento del T1 al incinerar a 400° ya que su valor se aproxima al máximo detectado con T3. Sin embargo, algunos autores como León Gutiérrez *et al.*, (1998) proponen el uso de soluciones digestoras en las que no se incluye este ácido, sino más bien otros como el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025N y HCl 0,05N en función lograr una digestión más completa. Algunos metales pesados encontrados comúnmente en los lodos residuales, como el Cu y el Zn, son elementos esenciales para las plantas ya que el Cu forma parte de algunas

Tabla 3. Valores de las medias y la desviación estándar correspondientes a la concentración de Cu (n=9).

Digestión	Ácido	Medias $\pm$ s (mg/kg)	Valores máximos y mínimos
A	T5	3,80 $\pm$ 0,55 a	4,98 – 2,73
I400°	T5	18,84 $\pm$ 5,48 a	30,82 – 12,17
A	T2	114,64 $\pm$ 11,89 b	150,76 – 94,36
A	T1	122,92 $\pm$ 16,18 bc	146,60 – 90,69
A	T4	124,29 $\pm$ 15,87 bcd	136,53 – 69,51
M	T3	138,61 $\pm$ 11,43 bcde	152,25 – 123,76
C	T3	141,81 $\pm$ 13,55 cdef	160,24 – 121,60
I550°	T2	148,24 $\pm$ 19,98 defg	171,93 – 85,40
A	T3	158,31 $\pm$ 8,58 efgh	174,11 – 145,46
I550°	T4	158,76 $\pm$ 14,41 efgh	174,78 – 124,86
I550°	T5	163,59 $\pm$ 12,91 efgh	174,99 – 124,86
C	T5	165,00 $\pm$ 9,13 fgh	184,38 – 143,58
M	T5	167,92 $\pm$ 5,46 gh	177,18 – 160,94
M	T4	177,49 $\pm$ 10,69 h	201,63 – 167,09
I550°	T1	177,84 $\pm$ 10,14 h	199,99 – 167,42
M	T2	177,97 $\pm$ 12,23 h	198,00 – 163,86
C	T4	178,40 $\pm$ 9,12 h	201,63 – 166,58
C	T2	181,94 $\pm$ 17,88 h	234,00 – 161,38
I550°	T3	184,37 $\pm$ 12,43 h	199,98 – 174,18
C	T1	226,01 $\pm$ 26,02 i	289,65 – 182,13
M	T1	254,67 $\pm$ 19,66 j	285,00 – 223,00
I400°	T2	569,61 $\pm$ 26,52 k	612,26 – 527,27
I400°	T1	616,35 $\pm$ 63,55 l	708,78 – 525,63
I400°	T4	622,27 $\pm$ 35,31 l	665,57 – 564,20
I400°	T3	782,54 $\pm$ 45,47 m	846,19 – 712,22

Letras distintas indican diferencias significativas (p 0,05). A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas.

enzimas que intervienen en los procesos de respiración y fotosíntesis.

Para Ville *et al.*, (1987), su deficiencia puede provocar problemas en los cultivos, mientras que según Costa *et al.* (1998) si se encuentran en exceso implican riesgos de toxicidad. En este sentido, Cuevas y Walter (2004) plantean que cuando se aplican lodos residuales con altos contenidos de Cu en suelos, sus efectos pueden ser perjudiciales para algunos cultivos como el de maíz, implicando una reducción en la producción del grano de hasta un 10%.

### 3. Evaluación del Contenido de Cromo (Cr)

En la Tabla 4, se observa que las menores concentraciones detectables de Cr se obtuvieron a través de T5

(HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) tanto por digestión abierta como por incineración a 400°C, valores que además de diferenciarse entre sí, presentaron diferencias significativas con respecto al resto de los tratamientos. Por su parte, la capacidad digestora del resto de los tratamientos aplicados previa incineración de las muestras a 400°C, se caracterizaron por ser los más altos y presentaron el siguiente orden creciente de concentración: T4 < T1 < T2 < T3, el comportamiento entre estos tratamientos se diferenció estadísticamente excepto entre T2 y T3, lo cual podría considerarse un indicativo de que ambas soluciones ácidas resultan eficientes para la determinación del elemento Cr. El grado de variabilidad aumentó significativamente al establecer una comparación extragrupal de cada tratamiento.

Tabla 4. Valores de las medias y la desviación estándar correspondientes a la concentración de Cr(n=9).

Digestión	Ácido	Medias $\pm$ s (mg/kg)	Valores máximos y mínimos
A	T5	3,61 $\pm$ 0,44 a	4,63 – 2,93
I400°	T5	18,08 $\pm$ 1,71 b	22,25 – 15,94
A	T4	21,44 $\pm$ 5,36 bc	27,80 – 16,62
A	T1	26,74 $\pm$ 5,69 bcd	38,16 – 20,51
C	T1	31,58 $\pm$ 2,88 cde	36,29 – 25,36
A	T2	31,59 $\pm$ 4,13 cde	38,48 – 25,87
A	T3	32,02 $\pm$ 2,64 de	36,23 – 26,61
I550°	T5	40,48 $\pm$ 3,26 ef	47,46 – 34,94
I550°	T4	41,84 $\pm$ 6,27 efg	49,92 – 29,79
I550°	T2	42,29 $\pm$ 2,73 fg	48,12 – 38,61
I550°	T3	44,78 $\pm$ 4,67 fgh	52,49 – 37,32
M	T5	45,01 $\pm$ 5,52 fgh	54,52 – 36,75
I550°	T1	48,22 $\pm$ 4,69 fgh	58,80 – 40,00
C	T5	51,35 $\pm$ 16,42 ghi	107,15 – 35,08
M	T1	54,37 $\pm$ 21,84 hij	93,65 – 32,90
C	T2	60,22 $\pm$ 11,22 ij	93,49 – 48,35
C	T3	63,96 $\pm$ 10,17 jk	77,00 – 43,04
M	T3	71,60 $\pm$ 3,85 jk	76,50 – 63,79
C	T4	72,81 $\pm$ 4,21 k	78,97 – 65,60
M	T4	73,48 $\pm$ 4,78 k	78,97 – 66,21
I400°	T4	107,28 $\pm$ 10,63 l	131,91 – 94,08
I400°	T1	134,08 $\pm$ 28,64 m	192,28 – 103,73
I400°	T2	157,01 $\pm$ 20,53 n	192,45 – 127,59
I400°	T3	158,31 $\pm$ 13,84 n	192,45 – 132,36

Letras distintas indican diferencias significativas (p 0,05). A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas.

El Zauahre (2003) determinó una concentración media de Cr en lodos residuales procedentes de la misma planta de tratamiento de  $46,83 \pm 8,61$  mg/kg, utilizando la digestión en bombas Parr con una solución 3:1 de HNO<sub>3</sub>-HCl, correspondiendo con el T2 empleado en esta investigación, el cual al ser aplicado previa incineración de la muestra a 400°C obtuvo una de las concentraciones más altas de este elemento, a partir de lo cual puede inferirse que a temperaturas muy altas, como las alcanzadas en las digestiones en bombas tipo Parr o incinerando a 550°C, parte del elemento pudiera perderse. La técnica de acidificación con HNO<sub>3</sub> concentrado/incineración a 550° fue utilizada por Akrivos *et al.* (2000) al evaluar el contenido de nutrientes de tres suelos alcalinos (pH 8) tratados con lodos residuales, sin embargo, esta temperatura de incineración obtuvo concen-

traciones muy inferiores a las obtenidas a 400°C por lo que no se recomienda su utilización en este tipo de matriz.

#### 4. Evaluación del Contenido de Níquel (Ni)

Las concentraciones más altas de Ni se determinaron a partir de la digestión basada en la incineración/acidificación de las muestras a 400°C (Tabla 5). En este caso, el mayor valor se detectó a partir de T3, entre este tratamiento y el T2 aplicado en condiciones cerradas, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, por lo cual ambos procesos de digestión con su respectiva solución ácida pudieran considerarse óptimos para la determinación de Ni en este tipo de muestras. Estos valores fueron superiores a la concentración detectada por El Zauahre (2003), la cual tuvo una media de  $61,38 \pm 11,44$  mg/kg, a pesar de que los lodos obje-

Tabla 5. Valores de las medias y la desviación estándar correspondientes a la concentración de Ni (n =9)

Digestión	Ácido	Medias $\pm$ s (mg/kg)	Valores máximos y mínimos
A	T5	7,28 $\pm$ 2,15 a	11,18 – 4,52
A	T2	10,89 $\pm$ 1,69 ab	14,55 – 7,92
A	T4	14,20 $\pm$ 1,85 b	16,31 – 7,25
A	T1	14,69 $\pm$ 1,93 b	18,68 – 11,92
A	T3	15,53 $\pm$ 1,27 b	17,39 – 13,51
I550°	T4	24,57 $\pm$ 1,92 c	28,59 – 22,10
I550°	T5	27,45 $\pm$ 1,21 cd	29,98 – 24,97
I550°	T2	30,34 $\pm$ 2,00 de	33,94 – 25,11
I550°	T1	33,33 $\pm$ 2,09 ef	40,05 – 30,12
I550°	T3	33,55 $\pm$ 1,51 ef	34,97 – 30,00
I400°	T5	36,21 $\pm$ 6,41 f	51,21 – 30,22
M	T5	52,63 $\pm$ 4,39 g	59,84 – 44,56
C	T5	53,86 $\pm$ 5,12 g	66,88 – 44,87
I400°	T2	54,08 $\pm$ 7,76 g	70,81 – 43,01
M	T1	54,31 $\pm$ 4,40 g	62,30 – 48,62
C	T1	55,78 $\pm$ 9,06 gh	80,12 – 44,91
M	T3	57,30 $\pm$ 5,85 gh	69,32 – 49,27
C	T3	57,34 $\pm$ 10,38 gh	79,32 – 44,03
C	T4	58,41 $\pm$ 14,06 gh	102,17 – 46,89
M	T4	61,10 $\pm$ 7,98 h	76,15 – 51,96
M	T2	70,05 $\pm$ 4,06 i	79,63 – 48,62
I400°	T4	71,09 $\pm$ 1,80 ij	75,38 – 67,12
I400°	T1	73,65 $\pm$ 9,75 ij	94,14 – 60,00
C	T2	76,46 $\pm$ 16,42 j	123,48 – 55,22
I400°	T3	76,77 $\pm$ 6,27 j	123,48 – 67,72

Letras distintas indican diferencias significativas (p 0,05). A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas

to de estudio, provienen de la misma planta de tratamiento y además, en uno de los casos se utilizó el mismo tipo de solución digestora (HNO<sub>3</sub>-HCl) y la misma técnica de digestión (bombas tipo Parr).

La presencia del níquel, tanto en las aguas residuales utilizadas para riego, como en lodos residuales utilizados como fertilizantes o mejoradores del suelo, es una de las causas de la contaminación en suelos y plantas. Brown et al (1988) afirman que el níquel se incluyó en la lista de los elementos esenciales para las plantas especialmente tal como lo refiere, Mahler (2003) en los procesos metabólicos, aun cuando éstas requieren menos de 0,001 mg/kg. Sin embargo Sheoran y Singh (1993) afirman que este elemento es fitotóxico cuando está presente en altas concen-

traciones. Uren (1992) refiere que se absorbe como catión Ni<sup>2+</sup> y para Krämer *et al* (1997), es transportado rápidamente a los sitios metabólicamente activos, ocasionando múltiples efectos tóxicos en el crecimiento.

##### 5. Evaluación del Contenido de Plomo (Pb)

Según los resultados que se presentan en la Tabla 6, las concentraciones más bajas de este elemento corresponden a todos los tratamientos aplicados previa incineración de las muestras a 550°C y a los sometidos a digestión abierta. Estas técnicas no presentaron variabilidad intragrupal significativa y su comportamiento permite inferir la ineficiencia de los mismos para actuar como oxidantes de la materia orgánica que tiende a interferir en la lectura de la

Tabla 6. Valores de las medias y la desviación estándar correspondientes a la concentración de Pb(n=9).

Digestión	Ácido	Medias $\pm$ s (mg/kg)	Valores máximos y mínimos
I550°	T5	25,23 $\pm$ 2,08 a	29,97 – 22,40
I550°	T3	28,56 $\pm$ 2,40 a	33,00 – 24,94
I550°	T1	30,05 $\pm$ 2,09 a	32,50 – 24,70
I550°	T4	30,34 $\pm$ 3,06 a	34,79 – 22,47
I550°	T2	30,37 $\pm$ 1,47 a	33,68 – 27,23
A	T5	50,57 $\pm$ 7,19 b	63,60 – 38,38
A	T3	54,43 $\pm$ 7,18 b	69,35 – 40,34
A	T2	58,87 $\pm$ 9,76 b	75,16 – 39,42
A	T1	60,57 $\pm$ 9,12 b	79,24 – 44,65
A	T4	60,63 $\pm$ 6,67b	71,04 – 48,31
I400°	T3	159,94 $\pm$ 8,87 c	332,41 – 146,48
C	T5	208,94 $\pm$ 14,14 d	228,96 – 187,82
M	T5	213,29 $\pm$ 10,59 de	225,64 – 190,79
C	T3	215,62 $\pm$ 22,33 de	270,95 – 179,29
M	T3	216,26 $\pm$ 34,23 de	270,95 – 179,29
I400°	T4	222,01 $\pm$ 9,24 ef	243,93 – 200,21
I400°	T5	229,42 $\pm$ 10,79 f	255,21 – 214,67
M	T2	243,63 $\pm$ 15,88 g	277,07 – 221,87
I400°	T2	244,31 $\pm$ 12,37 g	268,91 – 226,60
I400°	T1	247,38 $\pm$ 12,66 g	262,02 – 207,99
C	T2	263,42 $\pm$ 30,37 h	314,45 – 221,87
M	T4	283,17 $\pm$ 32,59 i	312,34 – 216,83
C	T1	285,87 $\pm$ 25,81 i	332,41 – 230,88
M	T1	299,19 $\pm$ 42,28 j	386,90 – 230,88
C	T4	304,29 $\pm$ 9,93 j	328,03 – 291,83

Letras distintas indican diferencias significativas (p 0,05). A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°C= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas.

concentración del elemento Pb. Por su parte, resaltan como las concentraciones más altas de Pb, los valores obtenidos a partir de T4 en condiciones cerradas y de T1 en horno microondas, los cuales no difieren estadísticamente entre sí por lo que pudieran considerarse como los más óptimos para la determinación de este elemento. Por otra parte, la comparación a nivel extragrupal de los procesos de digestión, evidenció diferencias estadísticamente significativas para todos los tratamientos.

Akrivos *et al.* (2000) proponen la incineración a 550°C en una mufla y la acidificación con HNO<sub>3</sub> concentrado para la determinación de Pb en un lodo residual seco, re-

portando concentraciones para este elemento de 161 mg/kg. Sin embargo, esta temperatura no resultó adecuada para la presente investigación considerando que generó los valores de concentración más bajos. Por su parte, Mosquera y Rigueiro (2007) emplearon la técnica de digestión asistida por microondas con HNO<sub>3</sub> concentrado obteniendo una concentración de Pb de 90,2 mg/kg en un lodo proveniente de una industria procesadora de algas al evaluar su efecto como fertilizante en plantaciones de *Eucalyptus globulus* labill y *Pinus pinaster* aiton, valor que resultó estar muy por debajo de uno de los máximos reporta-

dos en esta investigación ( $299,19 \pm 42,28$  mg/kg) empleando la misma técnica y solución ácida digestora.

La determinación del contenido total de Pb mediante técnicas analíticas confiables se considera un aspecto de gran importancia tomando en cuenta que este elemento no esencial, exhibe un alto potencial de toxicidad para las plantas, animales y humanos, debido a su considerable capacidad acumulativa en los tejidos.

### 6. Evaluación del Contenido de Zinc

Los valores más bajos del elemento Zn (Tabla 7) se observan en los tratamientos aplicados previa incineración a 550°C. Por su parte, los tratamientos aplicados mediante digestión abierta, cerrada y en horno microondas, no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en

tre sí. Cabe resaltar que todos estos valores de concentración, estuvieron muy por debajo de los valores determinados previa incineración de las muestras a 400°C, ya que bajo estas condiciones se obtuvieron las concentraciones más altas de este elemento. En este caso, se observó poca variabilidad entre T2, T1, T4 y T3, mientras que la concentración determinada a partir de T5 se diferenció de una manera muy significativa no sólo del resto de los tratamientos a 400°C, sino también de los otros procesos de digestión evaluados.

En la determinación de metales potencialmente tóxicos, como el zinc, otros tipos de soluciones digestoras han sido empleadas. Andrade *et al.* (2000) reportaron un contenido de Zn de 2000 mg/kg utilizando la digestión ácida en horno microondas con una mezcla de HNO<sub>3</sub>-HCl-HF,

Tabla 7. Valores de las medias y la desviación estándar correspondientes a la concentración de Zn (n=9)

Digestión	Ácido	Medias $\pm$ s (mg/kg)	Valores máximos y mínimos
I550°	T4	29,41 $\pm$ 2,78 a	34,87 – 23,95
I550°	T5	30,91 $\pm$ 3,19 a	37,34 – 24,94
I550°	T2	33,37 $\pm$ 2,46 a	37,36 – 26,86
I550°	T3	36,88 $\pm$ 3,49 a	42,50 – 32,35
I550°	T1	40,35 $\pm$ 3,63 a	50,01 – 34,83
A	T2	1039,61 $\pm$ 81,64 b	1191,13 – 874,09
A	T1	1104,72 $\pm$ 174,18 b	1387,54 – 780,20
A	T4	1131,49 $\pm$ 143,56 b	1250,44 – 610,69
A	T3	1190,21 $\pm$ 113,70 b	1457,55 – 1062,24
M	T3	1300,54 $\pm$ 36,84b	1367,89 – 1246,46
C	T3	1345,07 $\pm$ 111,38 b	1757,71 – 1246,46
C	T2	1363,26 $\pm$ 61,94 b	1525,38 – 1276,29
C	T5	1382,30 $\pm$ 51,75 b	1460,63 – 1305,64
M	T2	1391,48 $\pm$ 46,97 b	1462,00 – 1303,64
M	T4	1393,32 $\pm$ 61,56 b	1498,56 – 1335,91
M	T1	1404,74 $\pm$ 26,79 b	1441,53 – 1349,89
C	T1	1408,47 $\pm$ 107,07 b	1675,70 – 1221,86
M	T5	1432,56 $\pm$ 104,45 b	1584,61 – 1325,01
C	T4	1474,79 $\pm$ 110,65 b	1730,39 – 1335,91
A	T5	2942,72 $\pm$ 838,05 c	4511,32 – 1532,77
I400°	T2	3167,25 $\pm$ 422,07 d	3969,56 – 2348,90
I400°	T1	3539,75 $\pm$ 666,16 de	3991,96 – 1287,30
I400°	T4	3664,76 $\pm$ 342,76 de	3154,08 – 2073,31
I400°	T3	3884,35 $\pm$ 308,32 de	3401,38 – 2422,34
I400°	T5	4411,33 $\pm$ 476,94 f	5756,49 – 4192,36

Letras distintas indican diferencias significativas (p < 0,05). A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°C= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas.

Tabla 8. Comparación de las concentraciones más altas de los metales pesados determinados en los lodos residuales objeto de estudio (mg/kg) con los valores máximos permisibles regulados por organismos internacionales de protección ambiental para su utilización con fines agrícolas (Adaptado de Sauerbeck, 1993).

Digestión Metal	A	C	I550°	I400°	M	CE	EPA
Cd	3,42 ± 0,38	6,80 ± 0,46	4,99 ± 0,01	5,35 ± 0,10	6,32 ± 0,83	22 - 40	39
Cu	158,31 ± 8,58	226,01 ± 26,02	184,37 ± 12,43	782,54 ± 45,47	254,67 ± 19,66	1000 - 1750	1500
Cr	32,02 ± 2,64	72,81 ± 4,21	48,22 ± 4,69	158,31 ± 13,84	73,48 ± 4,78	1000 - 1500	1200
Ni	15,53 ± 1,27	76,46 ± 16,42	33,55 ± 1,51	76,77 ± 6,27	70,05 ± 4,06	300 - 400	420
Pb	60,63 ± 6,67	304,29 ± 9,93	30,37 ± 1,47	247,38 ± 12,66	299,19 ± 42,28	750 - 1200	300
Zn	2942,72 ± 838,05	1474,79 ± 110,65	40,35 ± 3,63	4411,33 ± 476,94	1432,56 ± 104,45	2500 - 4000	2800

A= Digestión abierta; C= Digestión cerrada; I400°= Incineración a 400°C; I550°C= Incineración a 550°C; M= Digestión en horno microondas; CE= Comunidad Europea; EPA= Environmental Protection Agency.

concentración inferior a la máxima reportada en esta investigación con el proceso de incineración a 400°C empleando como solución  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ . Según Espinoza (1998) este tipo de digestión con  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  ha sido utilizada para la determinación de metales pesados, como el Zn, en una amplia variedad de sustratos como muestras de suelo, lodos residuales y tejidos vegetales, O'neill, (1995) refiere que es de gran importancia considerando que este es un microelemento esencial para las plantas, participa en varios procesos metabólicos y es un componente de varias enzimas.

Finalmente, la Tabla 8 muestra la comparación entre las concentraciones máximas de los elementos potencialmente tóxicos (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) y las concentraciones máximas permisibles establecidas por la Comunidad Europea (EC Directive 86/278, 1986) y por la Agencia de Protección Ambiental norteamericana (USEPA), (1993) para lodos residuales que pueden ser dispuestos en suelos con fines agrícolas, evidenciando que las concentraciones detectadas de los metales objeto de estudio no sobrepasan los valores establecidos por las respectivas normativas, a excepción de los elementos Pb (digestión cerrada) según el valor máximo establecido por la EPA, y Zn (incineración a 400°C) de acuerdo a los límites regulados por ambos organismos.

En el caso del Pb habría que considerar que estos lodos residuales fueron muestreados en el año 2002, cuando aun no se había implementado el uso total de la gasolina sin plomo, lo cual conlleva a presumir que actualmente la concentración de plomo en los lodos sea menor en comparación al valor referido en esta investigación. Por su parte, en el caso particular del Zn, algunos autores Chicón (1998) y Quinteiro *et al.*, (1998) al realizar fraccionamientos se-

cuenciales de metales en lodos residuales reportaron que de la mayor concentración de Zn, aproximadamente el 90%, se encuentra en la fracción residual (fuertemente ligada), sólo niveles trazas se reportaron en las fracciones extraíbles, lo que implica una estabilidad apreciable, que hace poco propenso al Zn inmovilizarse fácilmente del lodo. Sin embargo, esta situación hace necesario establecer medidas de control y seguridad que permitan regular las dosis y frecuencia de aplicación de este biosólido con fines agrícolas.

### Consideraciones Finales

En referencia a la concentración de metales pesados se evidenciaron diferencias significativas tanto entre las técnicas de digestión empleadas como a nivel de las soluciones ácidas utilizadas en cada caso. Las concentraciones más altas de Cu, Ni, Zn y Cr, se obtuvieron empleando la técnica de incineración/acidificación a 400°C y los mayores valores de Cd y Pb, a través de la digestión cerrada en reactores de alta presión (Bombas tipo Parr). Por lo que estos tipos de digestión pudieran considerarse los más adecuados para la determinación del contenido total de estos metales en este lodo en particular. Además, de que ambos procesos resultan ser alternativas más viables en comparación con otras técnicas, como la abierta en plancha de calentamiento, en el sentido de que, son más rápidas de implementar, implican menor consumo de energía y de reactivos, generan mínima contaminación de las muestras y de la atmósfera del laboratorio, y adicionalmente, evitan la pérdida por volatilización de los elementos presentes en la muestra.

Por su parte, las soluciones ácidas que demostraron tener mayor capacidad para eliminar las interferencias generadas por la presencia de materia orgánica fueron:  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  (Cd y Pb),  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$  (Cu, Cr y Ni) y  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  (Zn). Considerando que las concentraciones totales más bajas de los metales analizados se obtuvieron a partir de las digestiones abiertas (Cd, Cu, Ni y Cr) y mediante la incineración/acidificación a  $550^\circ\text{C}$  (Pb y Zn) sería conveniente descartar el uso de estas técnicas de digestión en el análisis de metales para este tipo de sustrato. Finalmente, la concentración promedio de metales pesados en los lodos analizados, es inferior a los niveles máximos establecidos por organismos internacionales de protección ambiental, excepto para los elementos Pb y Zn, en cuyos casos deberán establecerse estrictas medidas de control en las dosis y frecuencias de aplicación del lodo.

## Referencias

- AHUMADA, I., ESCUDERO, P., CARRASCO, A., CASTILLO, G., ASCAR, L. FUENTES, E. (2004). Use of Sequential Extraction to Assess the Influence of Sewage Sludge Amendment on Metal Mobility in Chilean Soils. **J. Environ. Monit.** (6): 327-334.
- AKRIVOS, J., MAMAIS, D., KATSARA, K. AND ANDREADAKIS, A. (2000). Agricultural Utilization of Lime Treated Sewage Sludge. **Water Science and Technology.** (42) 9, 203-210.
- ALLOWAY, B. J. and JACKSON, J. P. (1991). The Behavior of Heavy Metals in Sewage Sludge-Amended Soil. **SCL. Total Environ.** (100): 151-176.
- ANDRADE, M. L., MARCET, P., REYZÁBAL, M. L. y MONTERO, M. L. (2000). Contenido, Evolución de Nutrientes y Productividad en un Suelo Tratado con Lodos Residuales Urbanos. **Edafología.** (7) 3, 21-29.
- APHA, AWWA, WEF. (1992). Standard Methods for examination of water and wastewater. 18th. Ed. American Public Health. Assoc. Washington, D.C.
- AYUSO, M., PASCUAL, J. A., GARCÍA, C. and HERNÁNDEZ, T. (1996). Evaluation of Urban Wastes for Agricultural Use. **Soil Sci. Plant Nutri.** 42, 105-111.
- BANKS, K. (2004). A Safety Assessment for Land Application of Biosolids. WERF Report Series: Biosolids & Residuals (Project 00-PUM-6).
- BERNAS, B. (1968). A New Method for Decomposition and Comprehensive Analysis of Silicates by Atomic Absorption Spectrometry. **Anal. Chem.** 40, 1682.
- BROWN, P.H., WELCH, R.M. and CARY, E.E. (1988). Nickel: A Micronutrient Essential for Higher Plants. **Plant Physiol.** (85): 801-803.
- CELIS, J., SANDOVAL, M., ZAGAL, E. y BRIONES, M. (2006). Efecto de la Adición de Biosólidos Urbanos y de Salmonicultura sobre la Germinación de Semillas de Lechuga (*Lactuca sativa L.*) en un Suelo Patagónico. **Rev. Ciencia del Suelo y Nutr. Veg.** 6 (3): 13-25.
- CHICÓN, L. (1998). Especiación de Metales Pesados en Lodos de Aguas Residuales de Origen Urbano y Aplicación de Lodos Digeridos como Mejoradores de Suelos. Disponible en: <http://usuarios.lycos.es/ambiental/lodos.html>.
- COSTA, F.; HERNÁNDEZ, M.T. y MORENO, J.I. (1987). Factores Limitantes de la Utilización Agrícola de los Lodos Residuales. En: Utilización agrícola de los lodos de depuradora. **CSIC. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura.** Murcia, España. pp 41-60.
- CUEVAS, G. and WALTER, I. (2004). Metales Pesados en Maíz (*Zea mays L.*) Cultivado en un Suelo Enmendado con Diferentes Dosis de Compost de lodo Residual. **Rev. Int. Contam. Ambient.** 20(2): 59-68.
- EL ZUAHRE, M. (2003). Evaluación de Lodos Residuales Aerobios y Su Utilización con Fines Agrícolas. Trabajo especial de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental. Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela.
- ESPINOZA, L.A., McNEAL, B.L. and NGUYEN, J.H. (1998). Nutrient and Metals Trends as a Result of Biosolids Application to a South Florida Citrus Grove. **Soil Crop Sci. Soc. Florida Proc.** 57: 39-50.
- FRESQUEZ, P.R., FRANCIS, R.E. and DENNIS, G.L. (1990). Sewage Sludge Effects on Soil and Plant Quality in Degraded Semiarid Grassland. **J. Environ. Qual.** (19):324-329.
- KRÄMER, U., SMITH, R.D., WENZEL, W.W., RASKIN, I. and SALT, D. E. (1997). The Role of Metal Transport and Tolerance in Nickel Hyperaccumulation By *Thlaspi goesingense hálácsy*. **Plant Physiol.** (115): 1641-1650.
- LEÓN G., F., ROJAS, D. JIMÉNEZ, M., SERNA, L. y ZAPATA, R. (1998) Evaluación de la eficiencia agronómica de un lodo residual como bioabono en un ultisol. **Ediciones Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.** Medellín. Colombia. 105-116p.
- MAHLER, R.L. (2003). General Overview of Nutrition for Field and Container Crops. In: RILEY, L.E.; DUMROESE, R.K.; LANDIS, T.D., Tech Coords National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. June 9-12; Coeur d'Alene, ID; and July 14-17; Springfield, IL. Proc. RMRS-P-33. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- MOSQUERA L., M.R; RIGUEIRO R., A. (2007). Efecto del Empleo de Diferentes Dosis de Lodo Procedente de Industria Procesadora de Algas como Fertilizante en Plantaciones de *Eucalyptus globulus labill* y *Pinus pinaster aiton*. **Boletín del CIDEU.** (3): 181-187.
- O'NEILL, P. (1995). Environmental Chemistry. Second edition. **Chapman & Hall.** London. 215-221p.

- OTERO, J.L., ANDRADE, M.L., MARCET, P. (1996) Caracterización Química y Evaluación Agronómica de Dos Tipos de Lodos Residuales. **Inv. Agric. Prod. Veg** (11): 117-131.
- PUGA, S., SOSA, M., LEBGUE T., QUINTANA, C. y CAMPOS, A. (2006). Contaminación por Metales Pesados en Suelo Provocada por la Industria Minera. **Ecología Aplicada**, 5(1,2):149-155.
- QUINTEIRO, M.P., ANDRADE, M.L. y DE BLAS, E. (1998). Efecto de la Adición de un Lodo Residual sobre las Propiedades del Suelo: Experiencia de Campo. **Edafología**. (5): 1-10.
- ROBARDS, K.S. and WORSFOLD, P. (1991). Cadmium: Analysis and Toxicology. **Analyst**. 116: 549 – 568.
- SAUERBECK, D.R. (1993). Plant Element and Soil Properties Governing Uptake and Availability of Heavy Metal Derived from Sewage Sludge. **J. Environ. Qual.** (20): 387.
- SHEORAN, I.S. and SINGH, R. (1993). **Effect of Heavy Metals on Photosynthesis in Higher Plants**. In: Y.P. Abrol, P. Mohanty y Govindjee (eds.). *Photosynthesis: Photoreactions to plant productivity*. Kluwer. India. pp. 451-468.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOVA (1999). Infoestat/Profesional Versión 1.1. Estadística y diseño de la Facultad de Ciencias Agronómicas.
- UREN, N.C. (1992). Forms, Reactions, and Availability of Nickel in Soils. **Advances in Agronomy** (48): 141-203.
- URIBE M., H.R. y CHÁVEZ S., N. (2000). El Uso de los Biosólidos para Mejorar la Productividad de los Suelos Agrícolas. Informe anual de actividades. CEDEL-INIFAP. México.
- USEPA (1993). Standards for the use or disposal of sewage Sludge. Fed. Reg. 58, 210-238.
- USEPA. (1994). Method 3051. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludge, soils, and oils. In: Test methods for evaluating solid wastes. Physical/chemical methods. SW-846, Volume 1, Section A, Part I, Chapter 3. 3051-1 – 3051-14.
- VILLEÉ C., SOLOMON, E., DAVIS, W. (1987). *El Fascinante Mundo de la Biología Tomo I*. Editorial McGraw-Hill Interamericana. México.