

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LODOS VERMICOMPOSTADOS Y SU
EFECTO EN TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.)**

**TESIS
QUE PRESENTA**

MAXIMINO GARCÍA CAMILO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

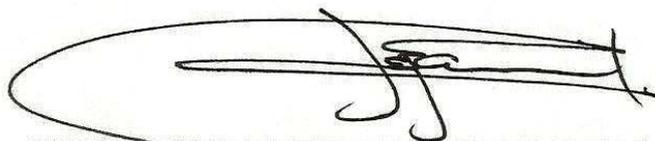
ENERO, 2011

**TESIS QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO
EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO**

DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

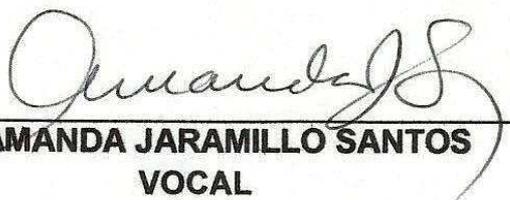
APROBADA POR:



**DR. ALEJANDRO MORENO-RESÉNDEZ
PRESIDENTE DEL JURADO**



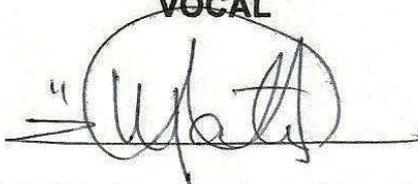
**ING. JOEL LIMONES AVITIA
VOCAL**



**MC AMANDA JARAMILLO SANTOS
VOCAL**



**IIQ. ELBA MARGARITA AGUILAR MEDRANO
VOCAL**



**ME. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas**

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

ENERO, 2011

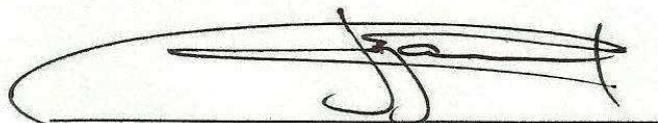
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LODOS VERMICOMPOSTADOS Y SU
EFECTO EN TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.)**

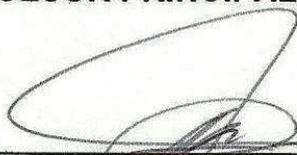
POR

MAXIMINO GARCÍA CAMILO

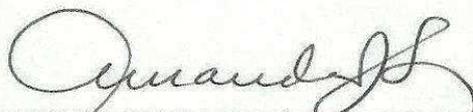
APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA



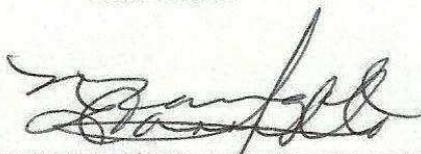
DR. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ
ASESOR PRINCIPAL



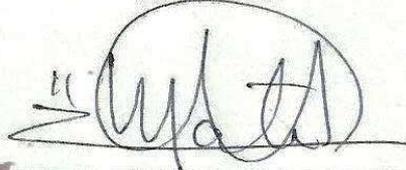
ING. JOEL LIMONES AVITIA
ASESOR



MC. AMANDA JARAMILLO SANTOS
ASESOR



QFB. NORMA LYDIA RANGEL CARRILLO
ASESOR



ME. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas**

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

ENERO, 2011

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por brindarme muchas oportunidades en mi vida, por poner a personas y bendiciones en mi camino, que formaron parte de este gran logro. Gracias padre celestial.

A Mi Alma Mater:

A esta magnífica institución noble, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, por todos los conocimientos que alberga en sus profesores investigadores y, que comparten con esmero y entrega.

Al Dr. Alejandro Moreno Reséndez,

Por su grata amistad, disponibilidad, dedicación, apoyo y experiencias compartidas para la realización de este proyecto. Por ser facilitador de los materiales de este proyecto de investigación.

A Mis Asesores IIQ, Elba Margarita Aguilar Medrano, Mc Amanda Jaramillo Santos, Ing. Joel Limones Avitia. Por su atinada dirección en desarrollo de esta investigación, análisis de datos, revisión del documento y por compartir sus conocimientos.

A la QFB Norma Lydia Rangel Carrillo, por su amable e incondicional disponibilidad en asesorarme con los análisis químicos en laboratorio.

DEDICATORIA

A mis padres.

Por enseñarme a vivir con rectitud y humildad, sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo. Con cariño y admiración.

A mis hermanas y hermanos.

Porque de ellos aprendí a buscar nuevos rumbos, a conquistar nuevas aventuras, nuevos lugares que conocer. Por sus orientaciones y consejos, por su cariño y comprensión.

A Mis Amigos.

Por estar siempre conmigo compartiendo momentos tristes y alegres, por regalarme su amistad incondicional.

No es fácil llegar, se necesita ahínco, lucha y deseo, pero sobre todo apoyo como el que he recibido durante este tiempo. Ahora más que nunca se acredita mi cariño, admiración y respeto, por lo que hemos logrado. A todos ustedes ¡¡Gracias!!.

RESUMEN

Las plantas de tratamientos de aguas residuales generan un subproducto conocido como lodos residuales o biosólidos. Estos subproductos representan un problema ambiental y de salud, ya que se consideran residuos peligrosos por su alto contenido de metales pesados y microorganismo patógenos. Su disposición final también representa problemas económicos y ambientales.

Estudios recientes han reportado que los lodos de las plantas de tratamientos de aguas contienen niveles óptimos de macro y microelementos y que se pueden ser reutilizados como fuente orgánica de elementos nutritivos para los cultivos, con previa estabilización biológica mediante el vermicomposteo, atendiendo las normas que rigen al respecto.

En atención a esta premisa se realizó el vermicomposteo de lodos derivados de la planta de aguas residuales de MET-MEX PEÑALES, con lombrices *Eisenia fetida*. Una vez concluido este proceso, se determinaron las características químicas de estos materiales en el laboratorio de suelos de la UAAAN-UL.

Para la caracterización química de los sustratos evaluados se aplicaron las técnicas de laboratorio establecidas en el Departamento de Suelos. Para las variables fisiológicas: días de germinación, altura de planta y diámetro del tallo, se aplicó el análisis de varianza (ANDEVA) y la comparación de medias la prueba de DMS_(5%), utilizando el paquete estadístico de Olivares-Sáenz.

Después de realizar la caracterización química de estos materiales, se utilizaron como sustrato para evaluar el desarrollo del tomate de cáscara. Los sustratos evaluados fueron diferentes vermicompost de: T1 = lodos residuales y estiércol de caballo, relación 2:1; T2 = lodos residuales; T3 = estiércol de caballo; T4 = lodos residuales y estiércol de caballo, relación 1:2, incluyéndose un testigo absoluto T5 = Suelo natural. Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 utilizados como sustrato en el cultivo de tomate de cáscara fueron los que mostraron mayor presencia de macro y microelementos nutritivos respecto al T5, con diferencias significativas en altura del cultivo.

PALABRAS CLAVES:

Biosólidos, vermicompost, suelos, elementos nutritivos, macroelementos, microelementos, norma oficial mexicana, metales pesados.

CONTENIDO

| | |
|---|----------|
| RESUMEN | V |
| ÍNDICE DE CUADROS | X |
| I.- INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivo | 4 |
| 1.2 Hipótesis | 5 |
| II.- REVISIÓN DE LITERATURA | 6 |
| 2.1 Plantas de tratamientos de agua residual | 6 |
| 2.2 Tratamiento y caracterización de aguas residuales | 7 |
| 2.3 Lodos o biosólidos..... | 8 |
| 2.4 Generación de biosólidos..... | 10 |
| 2.5 Manejo y disposición de biosólidos | 10 |
| 2.5.1 Tratamiento físico..... | 11 |
| 2.5.2 Tratamiento químico | 12 |
| 2.5.3 Tratamiento Térmico | 13 |
| 2.5.4 Tratamiento biológico | 14 |
| 2.6 Características del lodo residual..... | 18 |
| 2.7 Características físicas del lodo | 19 |
| 2.7.1 Textura. | 19 |
| 2.7.2 Porosidad..... | 20 |
| 2.8 Características químicas | 20 |
| 2.8.1 Materia Orgánica (MO). | 20 |
| 2.8.2 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). | 22 |
| 2.8.3 pH..... | 22 |
| 2.8.4 Conductividad Eléctrica (CE). | 24 |
| 2.9 Macroelementos nutritivos | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 2.9.1 Nitrógeno (N) | 25 |
| 2.9.2 Fósforo (P) | 26 |
| 2.9.3 Potasio (K) | 27 |
| 2.9.4 Sodio (Na) | 27 |
| 2.9.5 Calcio (Ca)..... | 28 |
| 2.9.6 Magnesio (Mg) | 28 |
| 2.10 Metales pesados..... | 28 |
| 2.10.1 Plomo (Pb) | 29 |
| 2.11 Microelementos | 30 |
| 2.11.1 Manganeso (Mn) | 30 |
| 2.11.2 Zinc (Zn) | 30 |
| 2.11.3 Cobre (Cu)..... | 31 |
| 2.11.4 Hierro (Fe) | 31 |
| 2.12 Los lodos como fertilizante | 32 |
| 2.13 Aspectos legales de los biosólidos | 36 |
| 2.14 Tomate de cáscara (<i>Physalis Ixocarpa</i> Brot.) | 40 |
| III.- MATERIALES Y MÉTODOS | 43 |
| 3.1 Localización geográfica | 43 |
| 3.2 Localización del experimento..... | 43 |
| 3.3 Condiciones del lugar del experimento..... | 43 |
| 3.4 Materias primas y organismos utilizados..... | 44 |
| 3.4.1 Lodos vermicomposteados | 44 |
| 3.4.2 Suelo natural..... | 44 |
| 3.4.3 Semillas de tomate de cáscara | 44 |
| 3.4.4 Unidad experimental | 45 |
| 3.5 Desarrollo del experimento | 45 |
| 3.6 Muestreo de material vermicomposteados | 45 |

| | |
|--|----|
| 3.6.1 Diseño de la unidad experimental..... | 46 |
| 3.6.2 Germinación, Altura de la planta y diámetro de tallo | 46 |
| 3.7 Variables evaluadas | 46 |
| 3.7.1 Metodología de los análisis químicos | 47 |
| IV.- RESULTADOS Y DISCUSION | 57 |
| V.- CONCLUSIONES | 67 |
| VI.- LITERATURA CITADA..... | 69 |
| VII.- ÁPENDICE..... | 82 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|-----------|
| Cuadro 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (SEMARNAT, 2003)..... | 37 |
| Cuadro 2. Aprovechamiento de biosólidos (SEMARNAT, 2003)..... | 38 |
| Cuadro 3. Límites de contaminantes por el uso de biosólidos en la producción de hortalizas (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 1994 y 1995)..... | 39 |
| Cuadro 4. Concentración máxima de metales pesados de CE y EUA .. | 40 |
| Cuadro 5. Diluciones realizadas a las muestras de sustratos iniciales para la determinación de su composición química. | 53 |
| Cuadro 6. Diluciones realizadas a las muestras de sustratos finales para la determinación de su composición química. | 54 |
| Cuadro 7. Valores para la curva de calibración en el aparato Perkin – Elmer 2380 para la determinación química de los elementos contenidos en los sustratos evaluados. | 54 |
| Cuadro 8. Propiedades químicas iniciales y finales de los sustratos evaluados durante el desarrollo del tomate de cáscara..... | 58 |
| Cuadro 9. Concentración máxima (ppm) de metales pesados permitida por la NOM-004-SEMARNAT-2002 y concentración promedio inicial de metales pesados en lodos vermicomposteados (base seca)..... | 59 |

Cuadro 10. Días de germinación, altura de planta y diámetro de tallos de tomate de cáscara en biosólidos vermicomposteados... 64

Cuadro 11. Prueba de comparación DMS(5%) y significancia estadística para valores promedio de las variables evaluadas en tomate de cáscara. UAAAN, 2010..... 65

I.- INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las naciones produce el fenómeno del urbanismo, trayendo consigo problemas tan grandes como la generación continua y progresiva de todo tipo de residuos, sólidos, líquidos y gaseosos (Vélez, 2007). Adicionalmente, el crecimiento demográfico e industrial de las ciudades ha provocado una mayor demanda de agua. De 1960 a 2008, la población de México aumentó de 34.4 a 106.1 millones de habitantes, impactando con una carga mayor sobre la infraestructura existente y un aumento en la producción de residuos domésticos y una mayor contaminación de los mantos freáticos. La tendencia de aumento en la población seguirá con la consecuente generación de aguas residuales (Mantilla, 2010).

Actualmente en México se cuenta con 1,833 plantas de tratamientos de aguas residuales municipales en operación que procesan $83.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y 2 021 plantas de tratamientos de aguas residuales industriales en operación. Las 1,833 PTARs en 2008 trataron el 40.2 % del total de las aguas residuales generadas y colectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipales, estimado en $208 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Igualmente se estima que la industria trató $29.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en las 2021 plantas en operación a nivel nacional durante el mismo año (CONAGUA, 2009).

Las PTARs generan un subproducto conocido como “biosólidos” o “lodos orgánicos” en México, o como “sewage sludge” o “biosolids” en otros países. Estos subproductos representan los residuos insolubles de los procedimientos de estabilización de lodos tales como: digestión aeróbica o anaeróbica (Aller *et al.*, 1999; Uribe *et al.*, 2003; Jurado *et al.*, 2006; Arthurson, 2008; Hernández-Hernández, 2009). Para los municipios con PTARs, el destino final de estos residuos representa un problema de tipo ambiental debido a su contenido de contaminantes como microorganismos patógenos y metales pesados. El confinamiento en relleno sanitario, la incineración y el uso agrícola son los principales métodos de desecho, los dos primeros están disminuyendo por ser costosos y por convertirse en una fuente potencial de contaminantes, mientras que el último está ganando aceptación (Uribe *et al.*, 2003).

Hoy en día, en los países industrializados, la disposición de los lodos residuales provenientes de las PTARs municipales e industriales, está asociado con el objetivo primordial, de interés nacional, de mejorar la calidad ambiental. Sin embargo, la disposición se ha convertido en un problema difícil y costoso para los organismos encargados del control de calidad ambiental. Es por esto que la aplicación de los lodos residuales al suelo ha sido vista como una alternativa que puede proporcionar un método, ambientalmente aceptable, para manejar estos productos de desecho (Acosta *et al.*, S/F).

En México, la generación de biosólidos es de aproximadamente 650,000 t•año⁻¹ en base seca mientras que en los Estados Unidos alcanza

6.3 millones de t•año⁻¹ en base seca. La Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002) contiene los lineamientos para el manejo y la disposición final de lodos orgánicos y biosólidos en México, con el fin de proteger el ambiente y la salud humana (SEMARNAT, 2003). De acuerdo a esta norma, los biosólidos pueden tener uso forestal, como mejoradores de suelo y en suelos agrícolas, siempre y cuando pertenezcan al menos al tipo “bueno” y a la clase “C” (Jurado *et al.*, 2007; Cota-Espericueta y Ponce-coral, 2008).

Los biosólidos son materiales orgánicos con altos contenido de N, P y K en combinación con altos niveles de compuestos orgánicos que impactan favorablemente sobre las propiedades físico-químicas y biológicas de los suelos, y por ende en beneficio de diversas especies vegetales, de ahí la importancia en la utilización como abonos para fertilizante en los cultivos (Arthurson, 2008; Pascual *et al.*, 2010). La aplicación de biosólidos en la agricultura es una práctica recomendable para reutilizar diversos elementos nutritivos y la materia orgánica presentes en este subproducto de las PTARs, lo cual da como resultado reducir el uso de fertilizantes sintéticos comerciales (Jurado *et al.*, 2007).

Para el adecuado manejo de los biosólidos y su posterior aplicación en la agricultura, es necesario llevar un proceso eficaz ambientalmente sostenible de higienización para reducir los contenidos microbiológicos nocivos así como su contenido de metales pesados, que reduzcan riesgos en el crecimiento de los cultivos y protejan la cadena alimenticia. Actualmente existe el interés en la utilización de sistemas biológicos para el

tratamiento de los lodos residuales como el vermicomposteo, el cual consiste en aprovechar la capacidad de reproducción de diferentes lombrices como: *Eisenia Fetida*, *Eisenia andrei* o *Eudrilus eugeniae*, que se caracterizan por tener un apetito voraz y una elevada tasa de reproducción y crecimiento, acelerando la descomposición de diversos residuos orgánicos, produciéndose sustrato con alta calidad de elementos nutritivos para la agricultura (Arthurson, 2008; Hernández-Hernández, 2009; Pascual *et al.*, 2010).

Por lo anterior, con el fin de evaluar la calidad del sustrato obtenido mediante el vermicomposteo de lodos residuales, se germinaron sobre estos materiales semillas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), para estudiar el comportamiento de esta especie vegetal.

1.1 Objetivo

- Determinar las características fisicoquímicas de lodos vermicomposteados con lombriz *Eisenia fetida*.
- Evaluar el comportamiento del tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). desarrollado en lodos vermicomposteados.

1.2 Hipótesis

Los lodos de plantas de tratamientos de aguas residuales pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos, posterior al tratamiento biológico de vermicomposteo.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Plantas de tratamientos de agua residual

El tratamiento de aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación ambiental y del agua, al igual que para la protección de la salud pública (Reynolds, 2002).

Cada región tiene sus propias necesidades correspondientes a métodos de tratamiento particulares, cierto número de opciones tradicionales y modernas de tratamiento se encuentran disponibles al diseñar una PTAR. Para diseñar cada PTAR es necesario hacer una evaluación del nivel óptimo de tratamiento requerido, al igual que una evaluación práctica de cuáles métodos de tratamiento está dentro del presupuesto de cada localidad. En aquellas áreas donde no es factible construir plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales, podrían emplearse otras opciones naturales para dicho tratamiento. Y en consecuencia el manejo efectivo de las aguas residuales deberá dar como resultado un efluente ya sea reciclado o reusable, o bien uno que pueda garantizar la descarga de manera segura en el ambiente, en el grado requerido por la legislación (Rodriguez *et al.*, 2006).

2.2 Tratamiento y caracterización de aguas residuales

En general, las aguas residuales incluyen dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. Para el tratamiento de las aguas residuales típicamente existen dos formas generales de tratarlas. La primera de ellas consiste en dejar que las aguas residuales se asienten en los estanques, permitiendo que el material sólido se deposite en el fondo de éstos. Después se trata la corriente superior de residuos con sustancias químicas para reducir el número de contaminantes dañinos presentes. El segundo método más común consiste en utilizar cierto tipo de población bacteriana para degradar los residuos orgánicos. Este método, conocido como tratamiento de lodos activados, requiere el abastecimiento de oxígeno a los microorganismos de las aguas residuales para realzar su metabolismo (Reynolds, 2002).

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen (Reynolds, 2002; Marsilli, 2005):

1. Pretratamiento—remoción física de objetos grandes.
2. Deposición primaria—sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
3. Tratamiento secundario—digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos.
4. Tratamiento terciario—tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección). También puede utilizarse para realzar los pasos del tratamiento primario.

Las tecnologías de precipitación— coagulación y floculación—por lo general involucran sistemas de alimentación química sofisticados que a menudo se encuentran fuera del alcance tecnológico de los operadores de las PTARs en las áreas más remotas. Mientras tanto, la filtración lenta con arena es utilizada más a menudo como una aplicación de agua potable, pero puede—bajo condiciones propicias—también ser utilizada para el control de las aguas residuales, jugando un papel doble como un sistema de tratamiento biológicamente activo antes de alimentar las corrientes naturales de agua (Reynolds, 2002).

Un gran número de PTARs domésticas, municipales y de residuos industriales están operando en México. El tratamiento utilizado en estas plantas es una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que genera enormes volúmenes de lodos orgánicos (Vélez, 2007)

2.3 Lodos o biosólidos

Los biosólidos son un subproducto de lodos generados durante el tratamiento de las aguas residuales. Éstos se producen durante etapas en donde ciertos microorganismos descomponen y transforman los lodos residuales, seguido por un proceso de estabilización biológica, física o química (Reynolds, 2002; Jurado *et al.*, 2006; Utria *et al.*, 2007; Fuentes *et al.*, 2008).

Los biosólidos son materiales semisólidos, de color oscuro, con alto contenido de materia orgánica y de elementos nutritivos. Sin embargo, también pueden contener altos niveles de micro-organismos patógenos y/o metales pesados (como plomo, cadmio, cromo etc.) que pueden causar problemas de salud, por lo que en consecuencia son considerados como residuos biológicos infecciosos (Mahamud *et al.*, 1996b; Jurado *et al.*, 2004; Pesinova, 2008).

Los biosólidos pueden ser de tipo doméstico o industrial, dependiendo de la procedencia de las aguas residuales, los primeros contienen menos contaminantes. También pueden ser de tipo aeróbico cuando se realiza un tratamiento de digestión con bacterias, o de tipo anaeróbico, que aunque costoso, es más eficaz para disminuir la cantidad de patógenos. Los biosólidos también pueden ser líquidos, deshidratados o secos, de acuerdo a su contenido de humedad y como resultado de los procesos en las plantas de tratamiento (Jurado *et al.*, 2004; Pesinova, 2008).

En muchos casos el mayor riesgo que representan los lodos de desecho es por su contenido de sustancias tóxicas, corrosivas, reactivas, explosivas o inflamables. Por estas razones los lodos de desecho de las plantas de tratamiento son residuos potencialmente peligrosos y es preciso aplicarles el análisis CRETIB (NOM-052-ECOL-1993) para determinar si son o no nocivos, y con base a ello definir su destino final (CONAGUA, 2009).

2.4 Generación de biosólidos

Actualmente, se desconoce la cantidad exacta de biosólidos generados en México. No obstante, con base a las expectativas del incremento en la capacidad para el tratamiento de aguas residuales, se estima que la generación de biosólidos en México alcanzará aproximadamente las 650,000 toneladas (en materia seca) por año, en un futuro próximo; para Estados Unidos, se estima en 7.4 millones y para la comunidad Europea con 15 países miembros en 7.5 millones (Jurado *et al.*, 2004; Pesinova, 2008).

El incremento significativo en la generación de biosólidos ha dado pie a un gran desafío para los municipios debido al tratamiento que, por obligación se les debe otorgar a estos materiales. Aunque hay opciones de la disposición de biosólidos, como la confinación en rellenos sanitarios y la incineración, cada una tiene sus problemas específicos y representan un riesgo de contaminación para el suelo, las aguas subterráneas y el aire. Además, estas opciones representan un desperdicio de elementos nutritivos los cuales, potencialmente, pueden ser reutilizados (Aller *et al.*, 1999; Esteller, 2002; Jurado *et al.*, 2004; Vélez, 2007).

2.5 Manejo y disposición de biosólidos

La necesidad de minimizar los biosólidos, así como su disposición adecuada y segura, son aspectos de suma importancia mundialmente, lo que ha llevado la búsqueda de alternativas tecnológicas y cambios en las

políticas de manejo que permitan generar residuos no peligrosos y estables para su correcta disposición o reaprovechamiento (Oropeza-García, 2006).

Los biosólidos son tratados en diferentes niveles dependiendo de su uso final, los procedimientos más comunes aplicados mundialmente para el manejo de éstos son la incineración y la disposición en rellenos sanitarios autorizados (Cortez-Cadiz, 2003; Jurado *et al.*, 2006).

Los métodos de tratamientos de lodos pueden estar orientados fundamentalmente a conseguir dos fines bien diferenciados. Por un lado, la existen una serie de tratamientos que llevan a cabo una estabilización de los biosólidos, es decir, los someten a un tratamiento que da lugar un producto adecuado para su utilización posterior, reduciendo su capacidad de fermentación y la presencia de organismos patógenos. Los procesos de tratamientos de lodos pueden, en general, dividirse en dos grandes categorías, procesos de estabilización de los lodos y procesos de reducción/eliminación del componente orgánico de los mismos (Mahamud *et al.*, 1996b).

2.5.1 Tratamiento físico

- Espesamiento

El espesamiento se emplea para concentrar el contenido sólido de los lodos mediante la eliminación en parte de su fracción líquida, consiguiendo una disminución importante en su volumen. Esta operación suele llevarse a cabo mediante procedimientos físicos que incluyen el espesamiento por

gravedad, flotación, centrifugación y filtro de banda por gravedad (Cortez-Cadiz, 2003).

- Desechado

El desecado consiste en la remoción de agua del lodo tanto como sea posible, reduciendo el volumen a tratar en operaciones subsecuentes. La técnica se basa en la evaporación y percolación natural o en la aplicación de medios mecánicos como filtros, centrifugas, canchas de secado y lagunaje. En el caso de los biosólidos se requiere un acondicionamiento previo antes de desaguarlos (Cortez-Cadiz, 2003).

2.5.2 Tratamiento químico

- Acondicionamiento químico

En este tratamiento se reduce la humedad del lodo desde un 90-99% a un 65-85% dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. Esto permite la coagulación de los sólidos y la alteración de agua absorbida por lo cual se efectúa antes de las operaciones de deshidratación. Entre los productos químicos más utilizados para este acondicionamiento se encuentra el cloruro férrico, la cal, el aluminio y los polímeros orgánicos. Su dosificación debe ser en forma líquida, por lo cual algunos reactivos requieren ser previamente disueltos antes de su incorporación (Cortez-Cadiz, 2003).

- Estabilización con óxido de calcio o cal

La estabilización con cal consiste básicamente en aumentar y mantener el lodo a pH 12 mediante la adición de cal. A consecuencia de ello, no se degradará la materia orgánica contenida en los biosólidos, no se generarán olores y se combatirá la existencia de microorganismos patógenos. Existen dos métodos de estabilización con cal, uno se realiza antes de la deshidratación y otro después de ella. Para la estabilización se suele utilizar cal viva y cal hidratada (Cortez-Cadiz, 2003; Oropeza-García, 2006).

2.5.3 Tratamiento Térmico

- Secado térmico

Este proceso permite eliminar el agua mediante la aplicación de calor extremo. El producto resultante contiene prácticamente todo el material sólido y sus contenido de humedad es del orden del 5 al 10% (Cortez-Cadiz, 2003; Oropeza-García, 2006).

- Incineración

Este proceso consiste en la combustión de los biosólidos, con la cual se destruyen los materiales orgánicos volátiles aprovechando el poder calorífico generado de estos materiales, minimizando la utilización de combustible externo (Cortez-Cadiz, 2003).

La incineración es un proceso térmico en el cual se realiza la oxidación química de los biosólidos con cantidades estequiométricas de

oxígeno en exceso. Los productos finales incluyen gases calientes de combustión (nitrógeno, anhídrido carbónico y vapor de agua) y los lodos se convierten en ceniza ((Oropeza-García, 2006).

- Oxidación por vía húmeda

Es un proceso que consiste en la oxidación del lodo crudo por vía humedad a presión y a temperaturas elevadas (entre 175 y 360 °C). Este proceso genera como residuos gases líquidos y cenizas. Los líquidos y las cenizas se reciclan para calentar los lodos y luego se extraen ya estabilizados en forma separada para ser enfriados (Cortez-Cadiz, 2003).

- Pasteurización

Consiste en un tratamiento térmico de los lodos que ocurre a 70 °C durante 30 minutos, permitiendo inactivar las larvas y huevos de los parásitos. Su práctica es obligatoria en Europa, no así en México (Mahamud *et al.*, 1996b; Cortez-Cadiz, 2003).

2.5.4 Tratamiento biológico

- Digestión anaeróbica

Es uno de los procesos más utilizados, en el que la degradación de la materia orgánica ocurre en ausencia de oxígeno y genera biogás. Existen diversos métodos de digestión anaerobia entre las cuales destacan las siguientes (Mahamud *et al.*, 1996b; Cortez-Cadiz, 2003; Oropeza-García, 2006; Ozores-Hampton y Mendez, 2010).

- Digestión convencional que se realiza en el intervalo mesófilo de temperaturas, entre los 30 y 38 °C.
- Digestión de una fase y carga alta, proceso que difiere del anterior por que la carga de sólidos en los lodos es mucho mayor y no se produce una separación de biosólidos y de sobrenadante.
- Digestión en dos fases, que consiste en una acción combinada entre un digestor de alta carga y un estanque, que sirve para almacenar lodos formando un sobrenadante clarificado.
- Digestión anaeróbica termofílica, que se produce a la temperatura situada entre los 49 y 57 °C, proporcionando condiciones adecuadas para la actividad de bacterias termofílicas.

- Digestión aeróbica

Corresponde a la estabilización de los lodos residuales mediante el suministro de aire (oxígeno), obteniéndose como producto anhídrido carbónico (CO₂), amoníaco (NH₃) y agua (no genera biogás). Es aplicable a biosólidos, mezcla de biosólidos con lodos primarios y lodos no desarenados (Cortez-Cadiz, 2003; Oropeza-García, 2006).

- Compostaje

Los lodos frecuentemente presentan un elevado contenido de humedad para poder ser utilizados en forma directa en el compostaje, por lo cual se suele agregar paja (productos agrícolas o forestales secos) que con su volumen disminuyan la humedad y además aumenten la relación C/N,

previniendo la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco (Premuzic *et al.*, 2002).

El compostaje consiste en la descomposición aerobia por parte de bacterias y hongos de la materia orgánica existente en el fango deshidratado, con formación de un nuevo producto. Para ello se lleva a cabo la mezcla del lodo deshidratado con un agente de textura o material soporte, que sirve para proporcionar porosidad y permitir la circulación de aire en el interior de la masa. Este material de soporte también suele actuar como fuente suplementaria de carbono para las reacciones biológicas. El biosólido compostado de forma técnicamente correcta, genera un humus higiénico, libre de olores y de sustancias patógenas, por lo cual se puede utilizar como mejorador de suelos (Grajales *et al.*, 2006; Oropeza-García, 2006; Ozores-Hampton y Mendez, 2010)

Los procesos de compostaje aplicados sobre los lodos ofrecen una mejora para algunos problemas que presentan estos residuos, como la alta conductividad eléctrica y elevado pH; sin embargo el uso de los biosólidos puede verse limitado debido a presencia de niveles tóxicos de metales pesados (Premuzic *et al.*, 2002).

El compostaje de biosólidos garantiza un producto con pH entre 6.5 y 8.0 que favorece el crecimiento de las plantas, reduce la movilidad de metales pesados (EPA, 1999), por lo que después del composteo estos

materiales pueden ser usados benéficamente como acondicionadores de los suelos (Torres *et al.*, 2007).

- Vermiestabilización

La vermiestabilización es un proceso de descomposición aerobio de bioxidación y estabilización de los diversos residuos orgánicos a través de la acción descomponedora conjunta de lombrices y microorganismos, que lo convierten en un material humificado y mineralizado (Grajales *et al.*, 2006; Durán y Henríquez, 2007).

La vermiestabilización es una tecnología basada en la cría intensiva de lombrices para la producción de humus de lombriz, también denominado vermicompost, a partir de diversos sustratos orgánicos. Este es un proceso de descomposición natural, similar al composteo termofílico, en el cual los materiales orgánicos, además de ser atacados por los microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras, etc.) existentes en el medio natural, también son por el complejo sistema digestivo de las lombrices. En el intestino de las lombrices ocurren procesos de fraccionamiento, desdoblamiento, síntesis y enriquecimiento enzimático y microbiano, lo cual tiene como consecuencia un aumento significativo en la velocidad de degradación y mineralización del residuo, obteniendo un producto de alta calidad (Cardoso, 2002).

El vermicompostaje de residuos orgánicos a través de la actividad de las lombrices (*Eisenia foetida*), ha resultado ser un método exitoso para el

tratamiento de lodos y aguas residuales para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo mejorando la disponibilidad de diferentes elementos nutritivos (Premuzic *et al.*, 2002).

El vermicompost, un producto obtenido de la acción conjunta de microorganismos y lombrices constituye una “enmienda orgánica” bioreguladora y correctora del suelo que produce una liberación lenta de elementos nutritivos y no presenta problemas de dosificación, aún en el caso de aplicarse puro en la producción de plantas (Premuzic *et al.*, 2002).

2.6 Características del lodo residual

La composición del lodo residual depende de las características del efluente del agua residual que entra a las PTARs y de los procesos de tratamientos utilizados, ya que entre más industrializada sea una ciudad, tendrá mayores posibilidades de contener metales pesados en mayor proporción y será un problema para aplicarlos a los suelos agrícolas (Cortez-Cadiz, 2003; Hernández-Herrera, 2004).

Los tratamientos para las aguas residuales, los programas de prevención de contaminantes y los procesos de tratamiento avanzado que se le aplican a las aguas residuales y los lodos, con el propósito de reducir los niveles de contaminantes del lodo final que se obtienen de las plantas de tratamientos y su composición varía entre cada planta de tratamiento (Mahamud *et al.*, 1996b; Hernández-Herrera, 2004).

Los biosólidos se caracterizan por su alto contenido de agua, la que les otorga un volumen importante y favorece sus pobres características mecánicas, dificultando su manejo y disposición final (Cortez-Cadiz, 2003; Gottschall *et al.*, 2009).

Caracterizar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lodos permitirá conocer su aptitud o inadecuación por posibles afecciones al suelo, cultivo y agua, así como su capacidad como fertilizante y acondicionador de suelos. Los criterios que se utilizan para determinar la calidad de los lodos para ser usados en la agricultura están basados, fundamentalmente, en la textura, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el pH, la conductividad eléctrica, la porosidad, el carbono orgánico total, el nitrógeno total, el fósforo, el potasio, el sodio, el calcio, el magnesio, el hierro, el manganeso y los metales pesados (cobre, zinc, plomo) (Esteller, 2002).

2.7 Características físicas del lodo

Textura, estructura y espesor de los lodos, que inciden en la permeabilidad al aire y al agua y en otros parámetros hidráulicos (Esteller, 2002).

2.7.1 Textura.

Es la composición física de los lodos, se refiere al porcentaje con el que se presentan los diversos materiales constitutivos de los lodos: arena, limo y arcilla. Los lodos tienen una buena textura cuando la proporción de los

elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición. La textura de los lodos es importante porque determina la rapidez con que el agua pasa por el suelo y asimismo cuánta agua puede mantener éste para uso de las plantas (Rucks *et al.*, 2004).

2.7.2 Porosidad.

El espacio poroso o porosidad total es la porción no sólida del volumen del sustrato. Representa el volumen de aire del material expresado como un porcentaje del volumen total (Pire y Pereira, 2003). La magnitud de la porosidad total, es mayor cuando en la textura dominan las fracciones finas que cuando dominan las gruesas. Los lodos arcillosos poseen más porosidad total que los arenosos (Rucks *et al.*, 2004).

2.8 Características químicas

Las características químicas de los biosólidos están relacionadas a sus cuatro constituyentes principales: Contenido orgánico, elementos nutritivos, concentración de patógenos, concentración de metales (Cortez-Cadiz, 2003). Estas características tienen incidencia sobre la fertilidad del suelo y su capacidad de fijar metales pesados.

2.8.1 Materia Orgánica (MO).

La materia orgánica de un sustrato es el componente más global que contribuye significativamente a mantener su capacidad productiva; influye en

características físicas tales como porosidad, estado de agregación de las partículas, densidad aparente, etc. y proporciona una reserva estable de elementos nutritivos para las plantas y organismos en el medio edáfico, modificando ciertas propiedades químicas de éste durante su mineralización (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007).

Los lodos residuales se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica. Se considera que los lodos residuales cuentan con un 50 % de MO, entonces estos biosólidos son susceptibles a ser aplicados a suelos, previos estudios y caracterización física y química (Mahamud *et al.*, 1996b; Aravena *et al.*, 2007).

La materia orgánica presente en estos residuos a diferencia de otros, contiene elementos orgánicos (proteínas, azúcares simples, ácidos orgánicos, aminoácidos, péptidos, u otros compuestos) considerados de fácil degradación por los microorganismo del suelo, quedando degradado en un periodo de tiempo relativamente corto (Utria *et al.*, 2007).

La materia orgánica reacciona con los metales formando complejos de cambio o quelatos. La adsorción puede ser tan fuerte que queden estabilizados, como el caso del Cu, o formen quelatos también muy estables, como puede pasar con el Pb y el Zn. En muchos casos se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto

conduce a una persistencia de la toxicidad (Hernández-Herrera *et al.*, 2005; Galán y Romero, 2008).

2.8.2 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

La CIC es la capacidad de los lodos para retener e intercambiar diferentes elementos minerales como el potasio (K), el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el sodio (Na) sobre las superficies cargadas negativamente (Stoffella, 2005). Esta capacidad aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica, y podría decirse que es la base de la fertilidad del suelo. La CIC depende de la textura del lodo y del contenido de materia orgánica. En general, entre más arcilla y materia orgánica en el lodo, la capacidad de intercambio es mayor. El contenido de arcilla es importante, debido a que estas pequeñas partículas tienen una relación alta de área superficial a volumen (INE, 2006; Mendoza y Arca, S/F).

2.8.3 pH.

La determinación del pH hace referencia a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+), por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos. El grado de acidez o alcalinidad es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación del sustrato-agua, y expresado en términos de la escala de pH. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números del 0 al 14.

Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad (INE, 2006).

El pH es uno de los parámetros más importantes que controlan las formas de los elementos en el suelo, influye de manera muy importante en la asimilación y como consecuencia en la absorción de los metales por las plantas. El aumento del pH reduce la asimilación y absorción del aluminio, cobre, hierro, cobalto, zinc y manganeso. El cadmio y el plomo en cultivos pueden incrementar sus concentraciones al disminuir el pH de los lodos (Lugo de la Fuente *et al.*, 2006)

La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, excepto algunos elementos como: As, Mo, Se y Cr, que son más móviles a pH alcalino (Galán y Romero, 2008).

Las escalas de valores del pH en la mayor parte de compuestos varían entre 6.0 y 8.0. Los biosólidos tienen un pH alcalino cercano al neutro, El valor final de un compost depende mucho de la materia prima, del proceso de fabricación y de la adición de cualquier enmienda. Una acidez o una alcalinidad excesivas pueden dañar a las raíces de las plantas, inhibir el desarrollo de las mismas, así como su crecimiento (Stoffella, 2005; Ozoreshampton y Mendez, 2010).

2.8.4 Conductividad Eléctrica (CE).

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en $\text{mmhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ o en $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$; la NOM-021-RECNAT-2000 establece $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ a 25°C . Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos. La determinación de la conductividad eléctrica es una forma indirecta de medir la salinidad del agua o de los extractos del lodo (López y López, 1985; Aller *et al.*, 1999; INE, 2006).

La unidad estándar de conductividad eléctrica es el Siemens•metro⁻¹ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1} = \text{Ohm}\cdot\text{m}^{-1}$), pero para evitar la expresión de resultados en pequeñas fracciones decimales se usa generalmente una unidad más pequeña: el miliSiemens•metro⁻¹ ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$). Aunque la conductividad generalmente es reportada en $\mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ (López y López, 1985; INE, 2006).

$$1 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1} = 10 \mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$$

La conductividad eléctrica de los lodos se encuentra en un rango de 2.96 a $7.11 \text{ mmhos}\cdot\text{cm}^{-1}$, por lo que se clasifica como desechos que van de poco salinos, donde los rendimientos de los cultivos muy sensibles se ve afectado, hasta residuos moderadamente salinos donde se reduce el rendimiento en diferentes vegetales (Cardoso *et al.*, 2002).

Algunas investigaciones mencionan que la conductividad eléctrica (CE) del suelo se incrementa con la aplicación de biosólidos a niveles que pueden afectar el crecimiento de los cultivos sensibles a la sal (Jurado *et al.*, 2004; Samaras *et al.*, 2008).

2.9 Macroelementos nutritivos

Los niveles de elementos nutritivos presentes en los biosólidos son una parte importante en la reutilización de éstos y su valor como fertilizante se basa principalmente en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio presente (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007; Samaras *et al.*, 2008). Los biosólidos aportan cantidades significativas de nitrógeno y fósforo que contribuye a disminuir el consumo de fertilizantes químicos sintéticos (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007; Acosta *et al.*, S/F).

2.9.1 Nitrógeno (N).

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la Tierra, pues en su forma gaseosa (N₂) constituye 78% de la atmósfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire (INE, 2006).

En los biosólidos los contenidos de nitrógeno total son significativos, (0.44-3.84%). Sin embargo, como sucede con muchos abonos orgánicos, el nitrógeno se encuentra en formas orgánicas que sólo quedan disponibles a las plantas en pequeñas concentraciones, pero que van a estar presentes en varios ciclos agrícolas después de la aplicación (Cardoso *et al.*, 2002).

2.9.2 Fósforo (P)

El fósforo es un macroelemento esencial para las plantas y los microorganismos. Puede ser un elemento limitante para las plantas, ya que es un componente de los ácidos nucleídos y de los fosfolípidos (Esteller, 2002; Jiménez, 2002).

El fósforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza porque se oxida muy fácilmente; sin embargo, son muy comunes los compuestos orgánicos y principalmente minerales que contienen fósforo. En términos generales, el fósforo del suelo se clasifica en fósforo orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos que forme. La forma orgánica se encuentra en el humus y la materia orgánica, y sus niveles en el suelo pueden variar desde 0 hasta concentraciones mayores de 0.2%. La fracción inorgánica está constituida por compuestos de hierro, aluminio, calcio y flúor, entre otros, y normalmente son más abundantes que los compuestos orgánicos. Solo una pequeña parte del P aparece en solución en suelo ($< 0.01-1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (Henry y Heinke, 1999; INE, 2006).

Los niveles de fósforo presentes en los biosólidos estabilizados son inferiores a los contenidos en los fertilizantes sintéticos y puede estar presente como ion fosfato y orto fosfato en forma mineralizada, de esta forma es como las plantas lo aprovechan efectivamente (Cortez-Cadiz, 2003).

2.9.3 Potasio (K)

El potasio es un constituyente abundante y vastamente distribuido en las rocas superficiales de la tierra; se calcula que representa, en peso, un 2,6% de la corteza terrestre. La riqueza en potasio, tanto intercambiable como no intercambiable, es sustancial, pues los cultivos no sólo asimilan potasio intercambiable sino que absorben potasio no intercambiable en importantes proporciones, sobre todo durante los lapsos más avanzados del período vegetativo (Moscatelli *et al.*, 2006).

Las plantas obtienen el potasio del suelo que proviene de la meteorización de los minerales, de la mineralización de los residuos orgánicos o el que proviene de los abonos y fertilizantes (Elvira, 2006).

El potasio se encuentra también con valores altos en los lodos (0.71-12.89 meq•100 g⁻¹ de suelo) (Cardoso *et al.*, 2002).

2.9.4 Sodio (Na)

El sodio ocupa el sexto lugar entre los elementos más abundantes y se encuentra en la mayoría de las aguas naturales. Los niveles pueden

variar entre menos de 1 mg de $\text{Na}\cdot\text{L}^{-1}$ y más de 500 mg $\text{Na}\cdot\text{L}^{-1}$. La relación de sodio con el total de cationes es importante en agricultura y patología humana. La permeabilidad del lodo puede ser perjudicada por una relación elevada de sodio (Franson, 1992).

2.9.5 Calcio (Ca)

El calcio ocupa el quinto lugar entre los elementos en orden de abundancia. El calcio contribuye a la dureza total del agua (Franson, 1992). Entre los beneficios de los biosólidos es que también contienen grandes cantidades de calcio (Stoffella, 2005).

2.9.6 Magnesio (Mg)

El Magnesio ocupa el octavo lugar entre los elementos más abundantes y es un componente común de las aguas naturales. Las sales de magnesio, contribuyen de forma importante a la dureza del agua (Franson, 1992). Los biosólidos contienen cantidades significativas de microelementos, siendo mayores para magnesio y calcio (Cardoso *et al.*, 2002; Ozores-Hampton y Mendez, 2010; Acosta *et al.*, S/F)

2.10 Metales pesados.

Químicamente se entiende por metal pesado aquel cuya densidad es mayor de $5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pero la costumbre ha hecho que la connotación se emplee para aquéllos que son tóxicos. Algunos metales son necesarios para los seres vivos, pero pueden llegar a ser tóxicos si rebasan ciertas concentraciones (Jiménez, 2002).

Junto a los beneficios del uso de lodos, también debe 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 consumidores de los productos de los mismos (Salcedo-Pérez *et al.*, 2007).

Los metales pesados presentes en los lodos contaminan el suelo y son posiblemente absorbidos por los cultivos en concentraciones tales que pueden ser nocivas para la salud de quien los consume, además se puede integrar a la cadena trófica, por eso es importante establecer su control en los campos de cultivo (Hernández-Herrera *et al.*, 2005).

2.10.1 Plomo (Pb)

El plomo es un importante veneno que se acumula en el organismo y su origen en el agua puede ser industrial, minero y descargas de hornos de fundición o de cañerías viejas de plomo (Franson, 1992; Jiménez, 2002). El plomo se encuentra en altas concentraciones en los biosólidos principalmente los provenientes de PTARs industriales (Cardoso *et al.*, 2002; Pesinova, 2008).

2.11 Microelementos

2.11.1 Manganeso (Mn)

El manganeso es un oligoelemento indispensable en el organismo, y es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre y, por lo general, se presenta junto con el hierro (Jiménez, 2002).

El manganeso libre (Mn^{2+}) pasa a las soluciones de los biosólidos y se fija sobre el complejo adsorbente. La proporción entre la forma iónica (Mn^{2+}) y las combinaciones MnO_2 y Mn_2O_3 en los lodos, depende de su potencial redox, pH y actividad microbiana. En pH extremos domina la acción fisicoquímica, mientras que en los intermedios son los procesos microbianos los que regulan la oxidación y reducción del manganeso (Urbano, 1992).

2.11.2 Zinc (Zn)

El zinc es un elemento esencial que se encuentra en concentraciones significativas en los biosólidos y que las plantas pueden absorber en formas iónicas (Zn^{2+}). El zinc en el agua puede tener origen en la contaminación por residuos industriales (Franson, 1992; Ahumada *et al.*, 2004). El Zn es un metal anfótero cuya solubilidad se incrementa a pH bajos y altos (Jiménez, 2002). Este microelemento se encuentra presente en todos los biosólidos y su concentración varía dependiendo del tipo de efluente de las PTARs (Pesinova, 2008).

2.11.3 Cobre (Cu)

El Cu^{2+} es fijado por el complejo arcillo-húmico y por las arcillas del suelo. En suelo con mucha materia orgánica y, especialmente con elevado contenido de humus, hay fuerte inmovilización de cobre en forma de quelatos (Urbano, 1992). La solubilidad del cobre aumenta bruscamente debajo de un pH de 5.0, y también a temperaturas más elevadas (Henry y Heinke, 1999). Los biosólidos proveen cantidades esenciales de microelementos como lo es cobre, y su concentración depende del tipo del efluente tratado (Pesinova, 2008; Ozores-Hampton y Mendez, 2010).

2.11.4 Hierro (Fe)

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre formando parte de combinaciones orgánicas, pero las más importantes son las formaciones minerales (Urbano, 1992; Jiménez, 2002)

El hierro orgánico aparece en el suelo en proporciones mucho menores que el hierro mineral. Se combina con los ácidos húmicos, fúlvicos, cítricos, salicílicos, etc. que se originan en los lodos al descomponerse la materia orgánica. Estas combinaciones del tipo "quelatos" y tienen la particularidad, a diferencia de las combinaciones minerales, de ser más solubles en medio neutro que en medio ácido. El hierro se encuentra estabilizado en el interior de los quelatos, libre de las oxidaciones y reducciones que tanto afectan al hierro mineral. Sin embargo, puede ser desplazado por Cu y Zn, que a su vez, se quelatan también (Urbano, 1992).

2.12 Los lodos como fertilizante

La agricultura mundial en los últimos años está encaminada a lograr una agricultura sostenible sobre la base de obtener altos rendimientos con aplicación de bajos insumos de fertilizantes sintéticos, y a revitalizado la idea de hacer uso de productos de origen orgánico (Hernández-Herrera *et al.*, 2005; Utria *et al.*, 2007). La aplicación de desechos humanos a suelos agrícolas se ha llevado a cabo desde el mismo inicio de la agricultura, sin embargo, su aplicación extensiva es reciente, y data del inicio del tratamiento de aguas residuales en donde se obtiene un subproducto llamado lodo residual o biosólidos (Martinez-de la Cerda *et al.*, 2004).

La posibilidad de reutilizar materiales orgánicos ricos en elementos nutritivos hace de la aplicación de los lodos residuales en los suelos agrícolas y forestales una alternativa ambiental importante, en contraste con las vías tradicionales de eliminación de este residuo (Jurado *et al.*, 2007; Fuentes *et al.*, 2008; Smith, 2009; Murillo *et al.*, S/F). Los lodos tienen cualidades similares al estiércol de ganado en cuanto a elementos esenciales (N, P, K Zn) y materia orgánica (aprox. 20%) y puede utilizarse para mejorar los suelos debido a estas características (Martinez-de la Cerda *et al.*, 2004; Tian *et al.*, 2006; Salcedo-Pérez *et al.*, 2007; Gottschall *et al.*, 2009).

Diversos autores han reportado que el uso de lodos como fuente de materia orgánica mejora las propiedades tanto físicas como químicas (Larchevêque *et al.*, 2006) del suelo agrícola en cuanto a incrementos en los

niveles de materia orgánica, reduce la densidad aparente, favorece una mayor formación y estabilidad de agregados, en el tamaño de los poros, de la fertilidad del suelo. Además aporta cantidades significativas de nitrógeno y fósforo que contribuye a disminuir el consumo de fertilizantes sintéticos (Bergkvist *et al.*, 2005; Castro, 2005; Salcedo-Pérez *et al.*, 2007; Utria *et al.*, 2007; Pesinova, 2008). Estos cambios dan lugar generalmente en una mayor capacidad de retención de agua en los suelos de textura gruesa y, a largo plazo, en mejores propiedades de transmisión de agua y resistencia a la erosión del suelo (Samaras *et al.*, 2008).

El efecto beneficioso del uso de los biosólidos en la agricultura no se limita solo a las propiedades químicas de los suelos. Ha sido demostrado por numerosos autores que además de éstas, las propiedades físicas, físico-químicas y biológicas de los suelos también se ven mejoradas con la adición de estos residuos. Estas mejoras incrementan la biomasa y el rendimiento de los cultivos (Tian *et al.*, 2006; Utria *et al.*, 2007; Fuentes *et al.*, 2008; Schroder *et al.*, 2008).

Aproximadamente el 55 y 47 % de los biosólidos se reutilizan en la agricultura de los Estados Unidos y de la Comunidad Europea, respectivamente, con efectos positivos en el rendimiento de los cultivos (Jurado *et al.*, 2006; Ozoires-Hampton y Mendez, 2010). Por ejemplo, en investigaciones realizadas en trigo de temporal por un período de 18 años consecutivos se ha encontrado que con la aplicación de lodo residual se iguala o incrementa el rendimiento comparado con fertilizante inorgánico en

años de poca precipitación y se obtienen rendimientos superiores en años lluviosos (Martínez-de la Cerda *et al.*, 2004).

El uso de biosólidos como fertilizante y mejorador de suelos ha sido aplicado en pastizales áridos y semiáridos en Estados Unidos. Los biosólidos aplicados superficialmente en dosis moderadas (15 a 45 t•ha⁻¹) han mostrado efectos benéficos sobre algunas propiedades del suelo y el crecimiento de diversos zacates (Jurado *et al.*, 2006).

Hernández-Herrera *et al.* (2005) en la aplicación de biosólidos en cultivo a cielo abierto, evaluaron la producción de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare* Pers.) en gramos por planta (base seca), bajo dosis de biosólidos (4 y 8 t•ha⁻¹), de estiércol de bovino (4 t ha⁻¹) y fertilizante químico N-P-K (120-60-00). Encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos ($P < 0.05$), En las comparaciones de medias de producción de forraje se obtuvo que las dosis de los biosólidos fueron superiores en rendimientos ante los demás tratamientos.

Jurado *et al.* (2006) evaluaron la producción y el valor nutritivo de forraje y semilla del zacate navajita [*Bouteloua gracilis* (H.B.K) Lag. Ex. Steud.] con efectos benéficos en producción de forraje, proteína cruda, digestibilidad y calidad de germinación de semillas, con dosis de 15 a 60 t•ha⁻¹ de biosólidos (Jurado *et al.*, 2006). Algunos estudios en México reportan efectos positivos sobre la fertilidad del suelo y sobre la producción de algunos cultivos, como algodón (*Gossypium hirsutum*) y tomate

(*Lycopersicon esculentum*), calabaza (*Cucurbita maxima*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*), con el uso de biosólidos (Figueroa *et al.*, 2008; Ozores-Hampton y Mendez, 2010). Uribe *et al.* (2003), en Chihuahua, reportan efectos benéficos sobre la producción de maíz forrajero (*Zea mays*) con la aplicación de 10.9 Mg ha⁻¹ de biosólidos incorporados al suelo.

Samaras *et al.* (2008) informan que el cultivo de algodón respondió en la captación de nitrógeno y fósforo con rendimientos favorables con dosis de 10 Mg•ha⁻¹ de biosólidos e indicaron que los lodos pueden sustituir el empleo de los fertilizantes inorgánicos, incluso a tasa de aplicación más bajo. En Florida, las dosis de aplicación en el nivel más bajo es de 6.7 a 13.5 t•ha⁻¹ reflejaron un incremento del rendimiento de los cultivos de tomate, calabaza y frijol. Los biosólidos se han utilizado en el cultivo de chile pimiento (*Capsicum annuum*) para reducir la dosis de N en un 50% lográndose alcanzar el mismo rendimiento comercial que un cultivo de chile pimiento con la aplicación de fertilizante sintéticos (Ozores-Hampton y Mendez, 2010). La biomasa de la planta fue mayor con la aplicación de biosólidos que el control al cual no se había aplicado biosólidos. Otros estudios han demostrado que los biosólidos mejoran el crecimiento y rendimiento del chile a través del aumento de la fertilidad del suelo y el metabolismo de la planta (Pascual *et al.*, 2010).

El valor económico de los lodos como fertilizantes en la agricultura representa un ahorro importante de nitrógeno, fósforo y en menor cuantía de potasio de los fertilizantes consumidos en México. En este sentido se puede

sugerir, que dentro de una economía nacional de recursos limitados, el reciclaje de los lodos de origen domésticos e industriales deben ser aprovechados en la agricultura (Acosta *et al.*, S/F).

2.13 Aspectos legales de los biosólidos

En lo referente a la disposición y utilización de los lodos, las consideraciones de tipo legal cobran especial relevancia puesto que las diferentes legislaciones de diversos países han establecido límites máximos permisibles de metales pesados que deben contener los biosólidos, para ser reutilizados en la agricultura, estos límites máximos, obedecen a dos factores principales, primero por la creciente preocupación social en lo referente a temas ambientales y segundo por la capacidad del desarrollo-técnico-científico disponibles para remover los contaminantes presentes en estos materiales (Mahamud *et al.*, 1996a; Aller *et al.*, 1999).

El estado mexicano ha creado un marco jurídico aplicado a los biosólidos. La NOM-004-SEMARNAT-2002, establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final, con el fin de proteger el ambiente y la salud humana (Jurado *et al.*, 2007; CONAGUA, 2009).

En México, cuando los lodos provienen de aguas muy contaminadas por compuestos tóxicos o metales pesados, su empleo es restringido en la agricultura, se pueden utilizar, pero deben cumplir con los límites máximos permitidos en la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 las cuales se presentan en el cuadro 1 (SEMARNAT, 2003).

De acuerdo con dicha norma, pueden tener un uso forestal, como mejoradores de suelo y en suelos agrícolas, siempre y cuando pertenezcan al menos al tipo "Bueno" y a la clase "C" cuadro 2 (SEMARNAT, 2003).

Los metales pesados presentes en los lodos contaminan el suelo y son posiblemente adsorbidos por los cultivos en concentraciones tales que pueden ser nocivas para la salud de quien los consume, además, se pueden integrar en la cadena trófica por eso es importante establecer su control en los campos de cultivos (Hernández-Herrera *et al.*, 2005).

Tanto en Europa como en Estados Unidos, las restricciones asociadas al procesamiento y utilización de los lodos tienden a incrementarse conforme aumenta la probabilidad de contacto con la población. Por ello, los requisitos legales para las diferentes opciones de utilización/disposición son distintos (Mahamud *et al.*, 1996a).

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (SEMARNAT, 2003)

| CONTAMINANTES (determinados en forma total) | EXCELENTES (mg•kg⁻¹ en base seca) | BUENOS (mg•kg⁻¹ en base seca) |
|--|---|---|
| Arsénico | 41 | 75 |
| Cadmio | 39 | 85 |
| Cromo | 1 200 | 3000 |
| Cobre | 1 500 | 4 300 |
| Plomo | 300 | 840 |
| Mercurio | 17 | 57 |
| Níquel | 420 | 420 |
| Zinc | 2 800 | 7 500 |

Cuadro 2. Aprovechamiento de biosólidos (SEMARNAT, 2003)

| TIPO | CLASE | APROVECHAMIENTO |
|-------------------|-------|--|
| EXCELENTE | A | <ul style="list-style-type: none">• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.• Los establecidos para clase B y C |
| EXCELENTE O BUENO | B | <ul style="list-style-type: none">• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.• Los establecidos para clase C |
| EXCELENTE O BUENO | C | <ul style="list-style-type: none">• Usos forestales• Mejoramiento de suelos• Usos agrícolas |

En los Estados Unidos los biosólidos y biosólidos mezclados con desechos de poda o desechos sólidos municipales son regulados a nivel Federal bajo la Ley de Agua Limpia Sección 503 (USEPA, 1994; Sukkariyah *et al.*, 2005). La Ley de Agua Limpia Sección 503 clasifica la calidad de los biosólidos con respecto a nueve contaminantes regulados, concentración máxima de contaminante, concentración de contaminación, tasa de carga de contaminación acumulada y la tasa de carga anual de contaminación (Schroder *et al.*, 2008) (cuadro 3).

Para prevenir la propagación de microorganismos patógenos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA), a través de la Parte 503 del Reglamento, afirma que los lodos deberán ser tratados debidamente para satisfacer determinadas normas microbianas antes de su aplicación a la tierra. A este respecto, la Ley de Agua Limpia Sección 503 establece dos clasificaciones de los biosólidos en función del nivel de patógenos y la reducción de atracción de vectores: clase A, tratados con procesos que contribuyen a reducir agentes patógenos hasta el punto no detectables, y la clase B, tratados con tecnologías que reducen significativamente los

patógenos, pero que no cumplen con el grado de saneamiento establecido en el Reglamento (Pascual *et al.*, 2010).

Cuadro 3. Límites de contaminantes por el uso de biosólidos en la producción de hortalizas (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 1994 y 1995)

| Contaminante | Límite máximo de concentración para todos los biosólidos aplicados al suelo [mg•kg ⁻¹ (ppm)] | Límite de concentración de contaminantes para el índice de calidad excepcional y Concentración de contaminantes de biosólidos [mg•kg ⁻¹ (ppm)] | Límite de tasa de carga de contaminantes acumulada (CPLR) de biosólidos (kg•ha ⁻¹) | Límite de tasa de carga de contaminante anual (APLR) de biosólidos (kg•ha ⁻¹ por periodo de 365 días) |
|--------------|---|---|--|--|
| As | 75 | 41 | 41 | 2.0 |
| Cd | 85 | 39 | 39 | 2.0 |
| Cu | 4 300 | 1 500 | 1 500 | 75 |
| Pb | 840 | 300 | 300 | 15 |
| Hg | 57 | 17 | 17 | 0.85 |
| Mb | 75 | --- | --- | --- |
| Ni | 420 | 420 | 420 | 21 |
| Se | 100 | 100 | 100 | 5.0 |
| Zn | 7 500 | 2 800 | 2 800 | 140 |
| Aplicado a: | Todos los biosólidos son aplicados al suelo | Biosólidos a granel y biosólidos en bolsas | Biosólidos a granel | Biosólidos empacados |

En el cuadro 4 se recogen los valores de concentraciones máximas de metales pesados en los biosólidos para que, de acuerdo con la legislación europea, puedan considerarse aptos para uso agrícola, pesados por hectárea y año y se comparan ambos valores con los correspondientes de la normativa estadounidense.

Según la legislación de la Comunidad Europea y la específica del Estado Español se exige además que lodos hayan sido sometidos a un tratamiento previo por vía biológica, química o térmica, mediante almacenamiento a largo plazo o por cualquier otro procedimiento apropiado, de manera que se reduzcan, de manera significativa, su poder de

fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización. Si bien la legislación comunitaria deja a discreción de los estados miembros la utilización de lodos no tratados cuando estos se inyecten o entierren en el suelo, la normativa española no contempla tal supuesto, exigiendo, que todo lodo destinado a la agricultura sea tratado previamente (Mahamud *et al.*, 1996a; Smith, 2009).

Cuadro 4. Concentración máxima de metales pesados de CE y EUA

| Metal | Concentración en el biosólido Mg/kg | | Aporte de contaminante | |
|-----------|--|------|------------------------|------|
| | CE | EUA | CE | EUA |
| Arsénico | - | 75 | - | 2.0 |
| Cadmio | 20-40 | 85 | 0.15 | 1.91 |
| Cromo | 1000-1750 | 3000 | 3.0 | 150 |
| Cobre | 1000-1750 | 4300 | 12 | 75 |
| Plomo | 750-1200 | 840 | 15 | 15 |
| Mercurio | 16.25 | 57 | 0.1 | 0.85 |
| Molibdeno | - | 75 | - | 0.90 |
| Níquel | 300-400 | 420 | 3 | 21 |
| Selenio | - | 100 | - | 5.0 |
| Zinc | 2500 | 7500 | 30 | 140 |

La legislación de los Estados Unidos es más concreta y restrictiva en lo referente a las características microbiológicas de los lodos destinados a usos agrícolas, definiendo dos niveles de calidad de biosólidos en función de la concentración de patógenos existente (Mahamud *et al.*, 1996a).

2.14 Tomate de cáscara (*Physalis Ixocarpa* Brot.)

El tomate de cáscara (*Physalis Ixocarpa* Brot.) es una Solanácea de origen mexicano. En 2004, la superficie sembrada con este cultivo en México fue 60,518.38 ha, con una producción cercana a 723,000 t y un valor de producción de \$ 2,506,091,478.00. Actualmente se cultiva en 28 Estados y

los principales productores son Sinaloa con 18,624.53 ha, Jalisco con 6865 y Puebla con 5226 (Caleyac *et al.*, 2007; Bazaldúa-Muñoz *et al.*, 2008).

El tomate verde de cáscara es un cultivo cuyo fruto se utiliza en la preparación de un gran número de platillos regionales, destacando las salsas y caldillos. El tomate verde es una fuente importante de fósforo, calcio, fierro, sales minerales, así como diversas vitaminas (PRODUCE, 2003). El establecimiento del cultivo de tomate de cáscara puede ser mediante siembra directa o utilizando semilleros que permitan la obtención de plántulas, las cuales posteriormente se trasplantan al terreno definitivo. Los semilleros pueden ser establecidos directamente en el suelo o utilizando recipientes con algún sustrato (Magdaleno *et al.*, 2006).

La planta de tomate verde es una herbácea anual de tallos pubescentes que llegan a medir hasta 1m de altura, su ramificación es dicotómica, las hojas son alternas, grandes y lisas de consistencia blanda, largamente ovaladas. Las flores son hermafroditas, regulares y pequeñas, aparecen solitarias en las axilas de las hojas en la parte terminal de las ramillas; la corola es gamopétala, en forma de campana de 2 a 2.5 cm de diámetro, esta constituido de cinco lóbulos de color amarillo; en el centro de la flor se localizan cinco estambres insertos en el tubo de la corola y alternando con los lóbulos, las anteras erectas, por las cuales sale el estilo; ovario súpero con numerosos óvulos. El fruto es una baya esférica u ovalada, de 2 a 5 cm de diámetro, liso, de colores amarillento, violáceo o verde brillante. La pulpa es amarilla y jugosa, con materia mucilaginosa que

rodea las semillas. El fruto se encuentra envuelto por el cáliz persistente, el cual es papiráceo y pegajoso interiormente, crece conforme se desarrolla el primero. La polinización es realizada principalmente por insectos. En esta planta no es posible la auto fecundación debido a la incompatibilidad gametofítica. Existe gran variación de tamaños y aspectos de los cálices, ya que mientras unos son demasiado grandes en relación al tamaño del fruto, otros alcanzan un tamaño similar al fruto, adhiriéndose con fuerza a su superficie y se rompen al llegar a su madures (PRODUCE, 2003).

En México existe una gran variabilidad genética en tomate de cáscara. Actualmente se reconocen al menos ocho razas: Silvestre, Milpero, Arandas, Tamazula, Manzano, Rendidora, Salamanca y Puebla, distribuidas prácticamente en todo el país en altitudes que van desde los 8 hasta los 3 350 msnm siendo las más importantes Rendidora, Salamanca y Tamazula, aunque en los últimos años la raza Puebla ha cobrado gran importancia, debido principalmente a que sus frutos son grandes, siendo muy atractivos tanto para el mercado nacional como para la exportación (Peña, 2001).

Por lo anterior, con el propósito de evaluar la calidad del sustrato obtenido mediante el vermicomposteo de los lodos residuales, provenientes de la planta tratadora de aguas residuales de la Cía Met-Mex Peñoles y después de haber realizado su caracterización química, se germinaron semillas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), Raza Arandas (colecta), para estudiar el comportamiento de esta especie vegetal.

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización geográfica

La Comarca Lagunera se encuentra conformada por las porciones sureste del estado de Coahuila y noreste del estado de Durango. Este territorio se localiza en la parte Centro-Norte de México. Se encuentra ubicada entre los meridianos 102° 22' y 104° 47' longitud Oeste, y los paralelos 24° 22' y 26° 23' de latitud Norte. La altitud de esta región sobre el nivel del mar es de 1,139 m. Cuenta con una extensión montañosa y una superficie plana donde se localizan las áreas agrícolas, así como las urbanas (Corona, 2005; Salazar-Sosa *et al.*, 2007).

3.2 Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en el área de producción de vermicompost de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-UL, la cual está localizada en Periférico y Carretera Sta. Fe, km 1.5 en Torreón Coahuila, durante el periodo Marzo – Diciembre de 2010.

3.3 Condiciones del lugar del experimento

El experimento se realizó en un área de 5 m de largo por 5 m de ancho, del sombreadero. El sombreadero esta cubierto de una malla

sombra con columnas metálicas que la sostienen. La superficie del suelo es plana sin malezas.

3.4 Materias primas y organismos utilizados

En este experimento se utilizaron los siguientes materiales: lodos vermicomposteados, suelo natural, semillas de tomate de cáscara, bolsas de polietileno para macetas, y agua para riego.

3.4.1 Lodos vermicomposteados

Los lodos o biosólidos vermicomposteados se obtuvieron en el área de producción de vermicompost. El origen de lodos residuales fue de la planta tratadora de aguas residuales de la industria MET – MEX PEÑÓLES S.A. DE C.V., ubicada en el Boulevard Laguna No. 3200 Poniente, Colonia Metalúrgica, Torreón, Coahuila, México. CP 27370.

3.4.2 Suelo natural

El suelo natural se obtuvo en el terreno del área de producción vermicompost, de la capa arable, de 0 - 30 cm.

3.4.3 Semillas de tomate de cáscara

Las semillas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) de la variedad Arandas, se obtuvieron por parte de la Universidad Autónoma Chapingo, de una colecta en La Leonora, Jesús María Jalisco.

3.4.4 Unidad experimental

Las unidades experimentales se establecieron en bolsas de polietileno negro tipo vivero para macetas. Estas unidades se colocaron al suelo, a una distancia de 0.80 m de distancia entre maceta y maceta.

3.5 Desarrollo del experimento

Los lodos fueron sometidos a tratamientos con lombrices durante un periodo de tres meses. Una vez concluido este proceso, los materiales de los tratamientos (T1 = lodos residuales y estiércol de caballo, relación 2:1; T2 = lodos residuales; T3 = estiércol de caballo; T4 = lodos residuales y estiércol de caballo, relación 1:2, incluyéndose un testigo absoluto T5 = Suelo natural) fueron cribados en malla de 0,5 cm para obtener un sustrato con partículas uniformes, el cual fue depositado en bolsas plásticas negras para macetas, con dimensiones de 12 cm x 12 cm de ancho por alto, respectivamente. Los materiales cribados fueron utilizados como sustratos para el desarrollo de tomate de cáscara

3.6 Muestreo de material vermicomposteados

Parte del material cribado de los tratamientos, se tomaron como muestras para la determinación de las características químicas en el laboratorio de suelo de la UAAAN-UL. Se tomaron muestras de cada uno de los tratamientos (T1, T2, T3, T4 y T5) antes de la siembra, e igual forma después de retirar las plantas evaluadas.

3.6.1 Diseño de la unidad experimental

Para este experimento se contaron con un total de cinco tratamientos. Para cada tratamiento se hicieron cuatro repeticiones, se sembraron tres semillas de tomate de cáscara por maceta. Las macetas fueron regadas diariamente manteniendo la humedad adecuada en función de las necesidades del cultivo.

3.6.2 Germinación, Altura de la planta y diámetro de tallo

Se tomaron registros de los días de germinación para cada maceta. Al día 27 después de la siembra, se registraron, con un estadal y un vernier los primeros valores de Altura de planta (AP) y Diámetro de Tallo (DT) de las plantas de tomate de cáscara, se selecciono la planta de mejor altura. Al día 43 después de la siembra las macetas fueron transferidas a bolsas plásticas negras para plantas de 25x25cm de ancho por alto respectivamente. La toma de datos se llevó a cabo cada 7 días hasta la fase productiva

3.7 Variables evaluadas

Para determinar la calidad de los lodos vermicomposteados como sustrato en tomate de cáscara, se analizaron los siguientes parámetros físicos-químicos: textura, MO, CIC, pH, CE, Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn, Mn, K, Pb, N, P. Para el caso del crecimiento del cultivo de tomate de cáscara se evaluaron días de germinación después de la siembra (DG), altura de planta (AP) y diámetro de tallo (DT).

3.7.1 Metodología de los análisis químicos

Antes de proceder al análisis químico, las muestras secas fueron trituradas con un mazo de madera y posteriormente tamizadas con una Malla Alsa de 2 y 0.5 mm, según está establecido para cada una de las propiedades químicas que fueron evaluadas. Las técnicas empleadas para el análisis de las muestras fueron las siguientes:

- **Textura**

La determinación de textura se llevó a cabo por el método del hidrómetro de Bouyoucos. Los materiales de los cinco tratamientos fueron tamizados en malla de 2 mm, se tomaron 50 gramos de cada uno de los tratamientos y se colocaron en probetas de Bouyoucos. En cada una de las probetas con las muestras contenidas, se le agregaron 10 mL de peróxido de hidrógeno, y 50 mL de hexametáfosfato de sodio. Se agitó hasta homogeneizar la mezcla, se agregó agua natural hasta completar 1130 mL con el hidrómetro dentro de la probeta. Se retiró el hidrómetro y se procedió a agitar con agitador metálico manual durante 1 minuto. A los 40 segundos después de la agitación se registraron la primera lectura de densidad y temperatura y la segunda lectura a los 120 minutos.

Para determinar la textura de los tratamientos con las lecturas obtenidas, se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\% A = 100 - (1^{\circ} \text{lect} \mp 1^{\circ} \text{temp})2$$

$$\% R = (2^{\circ} \text{lect} \mp 2^{\circ} \text{temp})2$$

$$\% L = 100 - (\%A + \%R)$$

Para realizar los cálculos, por cada °C grado centígrado arriba de 20 se sumaron a la lectura 0.36, o en caso contrario se restaron.

- **Materia Orgánica (MO)**

El análisis se realizó por medio del método de Determinación de Materia Orgánica (Walkley y Black Modificado). Por el alto contenido de materia orgánica que contiene el lodo residual, se aplicó una ligera modificación a los reactivos a utilizar, utilizándose las siguientes cantidades: 0.2 g de las muestras T1, T2, T3 y 0.5 g de T4 y T5, 5 mL de Dicromato de Potasio 1 N, 10 mL de ácido sulfúrico y 100 mL de agua destilada.

El procedimiento que se realizó fue el siguiente: Las muestras se cribaron en un tamiz Alsa de 0.5 mm, se pesaron 0.2 (T1, T2, T3 Y T4) y 0.5 g de suelo seco en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer® y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 500 mL, se adicionaron 5 mL de $K_2Cr_2O_7$ 1 N a la vez que se agitaba manualmente el matraz con cuidado para facilitar el mezclado uniforme. Luego se agregaron 10 mL de H_2SO_4 concentrado y se agitó manualmente el matraz en forma circular durante 1 min, dejándose reposar 30 min. Posteriormente se añadieron 5 mL de H_3PO_4 concentrado y como indicador se aplicaron 10 gotas de ferroína. La titulación se realizó con disolución de $FeSO_4$, virando a color rojo ladrillo.

Del mismo modo, se corrió un blanco de la muestra en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Este blanco fue necesario para calcular la normalidad exacta del $FeSO_4$ a partir del gasto que se obtiene al titularlo.

La fórmula para calcular el contenido de materia orgánica en porcentaje fue la siguiente:

$$MO(\%) = \frac{[(mLK_2Cr_2O_7)(Normalidad) - (mLFeSO_4)(Normalidad)](0.67)}{pesomuestra(g)}$$

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Una vez cribada la muestra con el tamiz de malla 2 mm, se pesaron 4 g de muestra de los tratamientos en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer® y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, posteriormente se le agregaron 15 mL de BaCl₂ 1N para disolverlo. El matraz Erlenmeyer fue tapado con una película de plástico Parafilm® para evitar un derrame o contaminar la muestra, que fue agitada 30 min a 180 rpm en el agitador mecánico Eberbach® modelo 6010. Posterior a la agitación la muestra se dejó reposar durante 24 h.

Al término de ese tiempo, la muestra fue filtrada a través de un embudo de porcelana con papel filtro Whatman® No. 5. La filtración se realizó al vacío con una bomba Roblenz® modelo dgp 144 y procurando recuperar los residuos de la muestra contenidos en el matraz Erlenmeyer, enjuagándolo con BaCl₂ 1N, del mismo modo se lavó el filtro con 60 mL de metanol al 70% en porciones de aproximadamente 10 mL cuidando que se filtrara totalmente la solución.

Terminada la filtración, el papel filtro con la muestra fue doblado y devuelto al mismo matraz Erlenmeyer que contenía la muestra inicialmente. Se le agregaron 100 mL de solución saturada de yeso al 5% en agua y se tapó con plástico parafilm® para agitarlo nuevamente por 30 min en el agitador mecánico Eberbach modelo 6010. Se filtró nuevamente la muestra a través de papel filtro Whatman No. 5 y el filtrado se recuperó en vaso de precipitado de 100 mL.

Para proceder a la titulación de la muestra, se obtuvieron 5 mL del filtrado (una alícuota) con una pipeta volumétrica de 5 mL, para colocarlos en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se agregaron 5 mL de agua destilada, 1 mL de solución Buffer y como indicador una gota de Negro Ericromo. La muestra se tituló con EDTA 0.02 N virando de color rojo vino a azul.

Del mismo modo, se preparó un testigo colocando 5 mL de solución saturada de yeso al 5% en agua en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se añadieron además 5 mL de agua destilada, cinco gotas de dietildietocarbamato de sodio al 1%, cinco gotas de NaOH y una gota de Murexida. El testigo fue titulado también con EDTA 0.02 N, virando de color rosa a lila.

La fórmula para calcular la CIC en $\text{meq} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de suelo fue la siguiente:

$$CIC_{\text{meq}} \cdot 100 \text{ g}^{-1} = \frac{(mL_{\text{gastotes tigo}} - mL_{\text{gastomue stra}})(N_{\text{EDTA}})(10000)}{Pesodelsue lo)(Alicuota)}$$

- **pH y Conductividad Eléctrica (CE)**

Estas dos determinaciones se pesaron 200 g de cada muestra en una balanza granataria digital Sartorius®, las muestras fueron colocadas en recipientes de plástico de 1 L, se les agregó poco a poco agua destilada y se mezclaron con una espátula metálica hasta que la pasta formada brillará con la luz y sin acumulación de agua sobre la superficie de las muestras. Ya saturadas las muestras se dejaron reposar por 24 horas a temperatura ambiente. Trascurrido este tiempo, las pastas fueron colocadas en un embudo de porcelana “Kitazato” con papel filtro Whatam® No.5 y se filtró al vacío con una bomba Roblenz® Modelo dgp 144, recuperando el extracto en un tubo de ensayo. Después de obtenido el extracto se determinaron tanto pH como CE, utilizando el potenciómetro marca Orión®, modelo 420 A. Para la medición del pH el potenciómetro se calibró con solución buffer de pH 4.0, 7.0. Posteriormente se sumergió el electrodo en cada muestra y se registró el valor de las lecturas realizadas. La determinación de CE se procedió de modo similar, pero ajustando el menú del dispositivo para realizar las lecturas correspondientes de CE en $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

- **Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na)**

Para la determinación de calcio, magnesio y sodio se utilizaron extracto de suelo a saturación y se leyeron por absorción atómica, Perkin – Elmer 2380. Se hicieron diluciones conforme sobrepasaba al reactivo estándar.

- **Cobre (Cu), Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Manganese (Mn)**

Para la determinación de microelementos (Cu, Fe, Zn y Mn) se pesaron 10 g de muestra de cada tratamiento en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer® y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, para extraer los microelementos, se agregaron 40 mL de DTPA a las muestras (T1, T2, T3 y T4), y 20 mL para T5, los matraces Erlenmeyer fueron tapados con una película de plástico Parafilm® para evitar el derrame de la muestra, que fue agitada 2 horas a 180 rpm en el agitador mecánico Eberbach® modelo 6010. Posterior a la agitación la muestra fueron filtradas con papel filtro Whatam® No.5, en vasos de precipitados de 50 mL y se leyeron por absorción atómica, Perkin-Elmer 2380. Se hicieron diluciones conforme sobrepasaba al reactivo estándar.

- **Potasio (K)**

Una vez cribada la muestra con el tamiz de malla 2 mm, se pesaron 5 g de muestra de los tratamientos en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer® y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, posteriormente se le agregaron 35 mL de acetato de amonio para disolverlo. El matraz Erlenmeyer fue tapado con una película de plástico Parafilm® para evitar un derrame o contaminar la muestra, que fue agitada 15 min a 180 rpm en el agitador mecánico Eberbach® modelo 6010. Posterior a la agitación se filtraron las muestras. Se tomaron 1 mL del filtrado y se colocaron en matraces de aforación de 100 mL; y se agregó agua destilada hasta aforar.

- **Plomo (Pb)**

Con muestras tamizadas con malla de 2 mm se determino la concentración de plomo, se pesaron 2 g de muestra de los tratamientos en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer® y se colocaron en frasco plásticos de 60 mL, posteriormente se le agregaron 50 mL de ácido nítrico 4M para disolverlo. Los frascos sin tapas, fueron colocados en baño María a 70 °C durante 12 horas. Después fueron agitadas 30 min a 180 rpm en el agitador mecánico Eberbach® modelo 6010. Posterior a la agitación se filtraron las muestras.

- **Diluciones**

En este apartado se mencionan las diluciones que se hicieron para las determinaciones inicial y final, de la composición química de los muestreos realizados durante el desarrollo del presente experimento (cuadros 5 y 6). La finalidad de las diluciones es obtener valores de Absorbancia que se encuentren dentro de los límites de la curva de calibración (cuadro 7). Ello permite conocer los resultados certeros de concentración de metal en la muestra.

Cuadro 5. Diluciones realizadas a las muestras de sustratos iniciales para la determinación de su composición química.

| Muestras | Ca | Mg | Na | Cu | Fe | Zn | Mn | K | Pb | P |
|----------|------------------------|-------------|------------|---------------------------------|----|----------|------|---------|-----|-------------|
| Métodos | Extracto de saturación | | | Digestión y extracción con DTPA | | | | DAA | DAN | MOM |
| T1 | 1:100:1:5 | 1:100:1:100 | 1:100:1:10 | 1:10 | LD | 1:25:1:5 | 1:25 | 0.5:250 | LD | 1.5:50:1:25 |
| T2 | 1:100:1:5 | 1:100:1:100 | 1:100:1:10 | 1:10 | LD | 1:25:1:5 | 1:25 | 0.5:250 | LD | 1.5:50:1:25 |
| T3 | 1:100 | 1:100 | 1:100:1:10 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 0.5:250 | 1:3 | 1.5:50:1:25 |
| T4 | 1:100 | 1:100:1:2 | 1:100:1:10 | 1:10 | LD | 1:25:1:5 | 1:25 | 0.5:250 | 1:3 | 2.5:50:1:25 |
| T5 | 1:100:1:5 | 1:100:1:5 | 1:100 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 1:100 | LD | 2.5:50:1:25 |

Tratamientos = T1 – T5; LD= Lectura directa; DAA= Digestión con Acetato de Amonio; DAN= Digestión con Ácido nítrico; MOM= Método Olsen Modificado.

Cuadro 6. Diluciones realizadas a las muestras de sustratos finales para la determinación de su composición química.

| Muestras | Ca | Mg | Cu | Fe | Zn | Mn | K | Pb | P |
|----------------|------------------------|-------------|---------------------------------|----|------|------|-------|-----|-------------|
| Métodos | Extracto de saturación | | Digestión y extracción con DTPA | | | | DAA | DAN | MOM |
| T1 | 0.5:100 | 0.5:100:1:1 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 1:100 | LD | 1.5:50:1:25 |
| T2 | 0.5:100 | 0.5:100:1:1 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 1:100 | LD | 1.5:50:1:25 |
| T3 | 0.5:100 | 0.5:100:1:1 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 1:100 | 1:3 | 1.5:50:1:25 |
| T4 | 0.5:100 | 0.5:100:1:1 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 1:100 | 1:3 | 2.5:50:1:25 |
| T5 | 0.5:100 | 0.5:100:1:1 | LD | LD | 1:25 | 1:25 | 1:100 | LD | 2.5:50:1:25 |

Tratamientos = T1 – T5; LD= Lectura directa; DAA= Digestión con Acetato de Amonio; DAN= Digestión con Ácido Nítrico; MOM= Método Olsen Modificado.

Cuadro 7. Valores para la curva de calibración en el aparato Perkin – Elmer 2380 para la determinación química de los elementos contenidos en los sustratos evaluados.

| | Ca | Mg | Cu | Fe | Zn | Mn | K | Na | Pb |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Estándar ppm | 5.0 | 0.5 | 5.0 | 5.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 1.0 | 20.0 |
| Long. onda (nm) | 422.7 | 285.2 | 324.8 | 248.3 | 213.9 | 279.5 | 766.5 | 589 | 217 |
| Slit (nm) | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.2 | 0.7 | 0.2 | 2.0 | 0.4 | 0.7 |
| Absorbancia | 0.239 | 0.282 | 0.28 | 0.22 | 0.24 | 0.169 | 0.204 | 0.336 | 0.46 |

- **Nitrógeno (N)**

La determinación del nitrógeno total se dividió en tres partes: digestión, destilación y titulación. Para realizar la digestión se pesaron, 0.5 g de la muestra que contenían lodos residuales (T1, T2, T3 y T4) y 2.5 g de muestra de suelo natural (T5) en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer®, sobre un papel filtro Waltham® No. 5, mismo que se colocó en un matraz Kjendahl. A este matraz se le agregó 1 g de ácido salicílico disuelto previamente en 35 mL de H₂SO₄ concentrado, procurando que no resbalara por las paredes; se dejó en reposo 30 min.

Posteriormente se agregaron 15.69 g de tiosulfato de sodio penta hidratado y 7.82 g de sulfato de cobre pentahidratado. Se realizó la digestión utilizando un equipo Kjendhal® modelo KGU - COMB, durante esta fase, el matraz conteniendo la muestra se volteo con frecuencia evitando que el suelo se pegara al recipiente todo ello hasta que la muestra alcanzó un color

verde claro. Se dejó enfriar la solución y se añadieron 300 mL de agua destilada.

Para la digestión, fue necesario preparar una solución de la siguiente manera: en un matraz Erlenmeyer de 500 mL se colocaron 10 mL de HCl 0.1 N, 50 mL de agua destilada y cuatro gotas de rojo metilo. Esta solución se colocó en el tubo de destilación. Al matraz Kjendhal con la muestra, se le agregaron 100 mL de NaOH al 45 % y una pequeña cantidad de perlas de ebullición, el cual se colocó en el destilador lo más rápido posible. En la solución del matraz Erlenmeyer de 500 mL se recogieron 200 mL de filtrado de la muestra. Posteriormente se tituló el filtrado de la muestra con hidróxido de sodio 0.1 N hasta que desapareció el color rojizo y se alcanzó un color verde claro.

A la par de la muestra, se corrió un testigo, y éste se tituló con NaOH 0.1 N hasta que desapareció el color rojizo y se obtuvo un color verde claro. El porcentaje de Nitrógeno total se determinó con la fórmula siguiente:

$$N_T(\%) = \frac{(mLNaOH_{testigo}) - (mLNaOH_{muestra}) * N * 0.014 * 100}{g_{desuelo}}$$

- **Fósforo (P).**

La determinación de fósforo se realizó por el método Olsen modificado. Se pesaron 1.5 gramos de muestra que contenían lodos

vermicomposteados (T1,T2,T3 y T4), y 2.5 gramos de muestra para el suelo natural en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer®, las muestras fueron depositadas en matraces de 125 mL, se añadieron 50 mL de solución bicarbonato de sodio 0.5 M. El matraz Erlenmeyer fue tapado con una película de plástico Parafilm®, que fue agitada 30 min a 180 rpm en el agitador mecánico Eberbach® modelo 6010. Posterior a la agitación las muestras se filtraron inmediatamente a través del papel filtro Waltham® No. 5 en vasos de precipitados de 40 mL.

Para la determinación de P se tomaron alícuotas de 5 mL del filtrado, se colocaron en tubos de aforación de 25 mL, se adiciono una gota de nitrofenol, 1 mL de H₂SO₄ 5N gota a gota, 4 mL de ácido ascórbico y finalmente se aforo con agua destilada, se cubrieron los tubos con película de plástico de Parafilm® y se agitaron. Después de 30 minutos se leyeron en absorbancia.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos en la caracterización química de los biosólidos vermicomposteados fueron comparados con las normas oficiales mexicanas, así como las de otros países, ejemplo EPA de los Estados Unidos (USEPA, 1994) y legislación de la Comunidad Europea (Mahamud *et al.*, 1996a) que han regulado el uso de los biosólidos en las actividades agrícolas y forestales. Para la caracterización de los biosólidos utilizados como sustrato en el cultivo de tomate de cáscara, se determinaron antes y después de la siembra, los siguientes parámetros químicos: MO, CIC, pH, CE, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn, Mn, Pb, Na, según criterios mencionados por Esteller (2002) y para determinar el comportamiento del cultivo de tomate de cáscara sobre estos materiales se evaluaron las siguientes variables: días de germinación después de la siembra (DG), altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT).

Como se puede observar en el cuadro 8, los materiales vermicomposteados presentan características químicas adecuadas y un mayor contenido de elementos nutritivos en comparación al suelo natural de acuerdo con Arthurson (2008) y Pascual *et al.* (2010), por lo cual resultan atractivos para utilizarse como fuente orgánica de dichos elementos, favoreciéndose la capacidad productiva de los suelos y el desarrollo de los

cultivos en este tipo de sustratos (Hernández-Hernández, 2009). Sin embargo, entre los valores iniciales y finales para cada tratamiento el proceso de vermicomposteo generó un producto de mayor calidad debido a las características químicas y a las concentraciones de los elementos nutritivos al concluir dicho proceso, lo cual se puede evidenciar con los valores registrados en la etapa final de las determinaciones químicas realizadas (cuadro 8). Los datos subrayados en columnas corresponden a mayores concentraciones iniciales y los datos en negritas a mayores concentraciones finales una vez que concluyo con el desarrollo del cultivo de tomate de cáscara.

Cuadro 8. Propiedades químicas iniciales y finales de los sustratos evaluados durante el desarrollo del tomate de cáscara.

| TRATAMIENTOS | T1 | | T2 | | T3 | | T4 | | T5 | |
|-------------------------------|---------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------|
| | VI | VF | VI | VF | VI | VF | VI | VF | VI | VF |
| TEXTURA | AF | | A | | A | | A | | AF | |
| MO (%) | 5.14 | 8.30 | 7.63 | 15.00 | <u>9.45</u> | 6.50 | 1.73 | 2.40 | <u>2.19</u> | 1.20 |
| CIC (meq•100g ⁻¹) | 22.00 | 42.00 | 16.00 | 33.00 | 10.00 | 29.00 | 19.00 | 27.00 | 9.00 | 28.00 |
| pH | 6.64 | 7.17 | 6.58 | 6.86 | <u>8.27</u> | 7.87 | <u>7.90</u> | 7.69 | 7.69 | 7.73 |
| CE (mS•cm ⁻¹) | <u>15.95</u> | 3.67 | <u>10.04</u> | 3.58 | <u>13.26</u> | 2.92 | <u>14.80</u> | 3.6 | 4.00 | 4.71 |
| N (mg•kg ⁻¹) | 9.52 | 10.92 | <u>19.04</u> | 16.8 | <u>14.00</u> | 1.96 | <u>17.08</u> | 11.48 | 1.96 | 3.03 |
| P (mg•kg ⁻¹) | <u>731.60</u> | 555.73 | <u>1028.00</u> | 796.30 | <u>1342.00</u> | 1129.63 | <u>965.00</u> | 450.62 | <u>165.00</u> | 75.68 |
| Ca (mg•kg ⁻¹) | <u>95.50</u> | 36.50 | <u>71.75</u> | 38.20 | 12.40 | 34.50 | 27.20 | 36.40 | <u>127.80</u> | 39.30 |
| Mg (mg•kg ⁻¹) | <u>32.17</u> | 9.05 | <u>40.75</u> | 8.40 | 4.48 | 8.40 | 7.25 | 9.71 | <u>22.25</u> | 8.89 |
| Cu (mg•kg ⁻¹) | <u>78.80</u> | 34.32 | <u>82.40</u> | 34.84 | 8.92 | 19.88 | <u>82.00</u> | 33.56 | 3.72 | 10.56 |
| Fe (mg•kg ⁻¹) | 19.44 | 20.28 | 18.80 | 20.32 | <u>23.36</u> | 20.44 | <u>22.20</u> | 20.56 | 8.92 | 10.20 |
| Zn (mg•kg ⁻¹) | <u>850.00</u> | 173.00 | <u>880.00</u> | 171.00 | 64.00 | 88.00 | <u>575.00</u> | 144.00 | 25.00 | 62.00 |
| Pb (mg•kg ⁻¹) | <u>502.80</u> | 294.75 | 353.30 | 498.5 | <u>696.80</u> | ND | <u>1287.00</u> | 185.5 | <u>274.30</u> | 81.75 |

Los tratamientos hacen referencia a diferentes vermicompost preparados a partir de T1 = lodos residuales y estiércol de caballo con relación 2:1; T2 = lodos residuales; T3 = estiércol de caballo; T4 = lodos residuales y estiércol de caballo con relación 1:2; T5 = Suelo natural. El vermicomposteo de los diferentes materiales se realizó con lombrices *Eisenia fetida*. Por fallas en el equipo de absorción atómica no se realizó la determinación de los elementos K, Mn y Na.

La comparación entre la concentración de los metales pesados obtenida en los biosólidos vermicomposteados analizados en este estudio con respecto a las concentraciones registrados en la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, con la ley de agua limpia sección 503 de la EPA y la legislación de la Comunidad Europea, se presenta en el cuadro 10. Derivado de esta comparación se observó que la concentración de cobre y zinc están muy por debajo del límite máximo permitido por las normas antes mencionadas, 4,300 y 7,500 ppm, respectivamente. En el caso del plomo a excepción del tratamiento T4, cuya concentración de plomo fue de 1,287 ppm, el resto de los tratamientos (T1, T2, T3 y T5) presentaron igualmente concentraciones por debajo del límite máximo permitido por dichas normas (USEPA, 1994; Mahamud *et al.*, 1996a; SEMARNAT, 2003) cuadro 9. Los resultados obtenidos coinciden con lo establecido por Contreras-Ramos *et al.* (2005) quienes también determinaron concentraciones por debajo de los límites establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) para estos metales pesados.

Cuadro 9. Concentración máxima (ppm) de metales pesados permitida por la NOM-004-SEMARNAT-2002 y concentración promedio inicial de metales pesados en lodos vermicomposteados (base seca).

| Metales | México | | USA | CE | Niveles de concentración | | | | |
|-----------|------------|--------|-------|-------|--------------------------|--------|--------|---------|--------|
| | Excelentes | Buenos | | | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
| Pb | 300 | 840 | 840 | 840 | 502.80 | 353.30 | 696.80 | 1287.00 | 274.30 |
| Cu | 1,500 | 4,300 | 4,300 | 4,300 | 78.80 | 82.40 | 8.92 | 82.00 | 3.72 |
| Zn | 2,800 | 7,500 | 7,500 | 7,500 | 850.00 | 880.00 | 64.00 | 575.00 | 25.00 |

México = NOM-004-SEMARNAT-2002; USA= Sección 503 EPA; CE= Legislación de Comunidad Europea. T1 = lodos residuales y estiércol de caballo con relación 2:1; T2 = lodos residuales; T3 = estiércol de caballo; T4 = lodos residuales y estiércol de caballo con relación 1:2; T5 = Suelo natural.

De acuerdo a la norma oficial NOM-004-SEMARNAT-2002, los biosólidos vermicomposteados fueron clasificados como de tipo “excelente”

considerando el contenido de los metales pesados, por lo que pueden ser aprovechados en usos forestales, el mejoramiento de suelos y usos agrícolas (SEMARNAT, 2003), lo anterior permitió el que los materiales disponibles para el presente experimento se utilizaran como sustratos adecuados para el desarrollo de tomate de cáscara.

- **Propiedades de los sustratos evaluados**

Todos los biosólidos vermicomposteados registraron la presencia de macro y microelementos nutritivos (cuadro 8) en la mayoría de ellos, excepto para el nitrógeno, la concentración de los mismos se redujo lo cual permite suponer que se encontraron de forma asimilables para las plantas, reflejándose lo anterior en el desarrollo registrado del tomate de cáscara, de acuerdo con Castro (2005) los elementos nutritivos son muy importantes, ya que cada uno de éstos tiene su función bien definida en la planta para su crecimiento y desarrollo normal y su deficiencia o exceso en el suelo causa trastornos fisiológicos, estos trastornos no fueron apreciados durante el crecimiento de este cultivo.

Las texturas determinadas en los biosólidos vermicomposteados correspondieron al tipo arenosa para los tratamientos T2, T3 y T4, y de textura media (franco-arenosa) para los tratamientos restantes (T1 y T5), de acuerdo a estas características la primera de ellas posee una excelente capacidad de aireación (Sánchez, 2007) y una elevada capacidad de infiltración y la segunda se caracteriza por presentar mayor aireación con mayor retención de humedad (Rucks *et al.*, 2004)

Al concluir el desarrollo de tomate de cáscara las concentraciones de materia orgánica en los sustratos vermicomposteados, tratamientos T1-T4 presentaron valores de 8.3%, 15.0%, 2.4% y 6.5% respectivamente, los cuales resultaron superiores al contenido de materia orgánica en el suelo, situación que coincide con lo establecido por Cruz-Rodriguez *et al.* (2003) quienes establecieron que comparados con el propio suelo, los residuos de las lombrices contienen mayores cantidades de materia orgánica y de otros elementos nutritivos. A manera de complemento, y como lo señalan Salcedo-Pérez *et al.* (2007) respecto a la relación directa entre materia orgánica y estructura del suelo, la materia orgánica disponible en los materiales vermicomposteados influyó sobre la estructura de los medios de crecimiento donde se desarrolló el tomate de cáscara.

La capacidad de intercambio catiónico ($\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$ de suelo), aumentó de 22.00 a 42.00 en T1, de 16.00 a 33.00 en T2, de 10.00 a 29.00 en T3, de 19.00 a 27.00 en T4 y de 9.00 a 28.0 en T5, los incrementos registrados favorecen el almacenamiento e intercambio de cationes, lo cual incide directamente con el incremento de los cationes a nivel del suelo, favoreciendo la disponibilidad de estos elementos nutritivos para diversos cultivos hortícolas como señala Stoffella (2005) y en este caso, por los resultados obtenidos, se logró promover el desarrollo del tomate de cáscara

En las muestras iniciales de los biosólidos vermicomposteados y del suelo, las conductividades eléctricas fueron elevadas, y disminuyeron

considerablemente después del desarrollo del cultivo. Las plantas tienen la habilidad de poder seleccionar la cantidad de diversos iones que absorben, dependiendo del requerimiento, tipo de planta cantidad de elementos nutritivos en el suelo, y de acuerdo a las especies puede variar esta habilidad de seleccionar cada uno de los iones en particular (Castro, 2005). A pesar de los reportes de diversos autores las plantas de tomate de cáscara no fueron afectadas, en su crecimiento y desarrollo, por las conductividades eléctricas registradas en estos materiales (Jurado *et al.*, 2004; Samaras *et al.*, 2008).

El pH de los biosólidos vermicomposteados y del suelo determina la disponibilidad de los diversos elementos para la planta. Un suelo es ácido si su pH es menor que 7, neutro si tiene un valor de 7 y alcalino si su pH es superior a 7. Dado que el pH es una función logarítmica, el cambio de una unidad en el pH supone un cambio de 10 veces en la concentración de iones H^+ , por tanto cualquier cambio en la unidad del pH puede tener un amplio efecto para la disponibilidad de iones para las plantas (Lugo de la Fuente *et al.*, 2006). Los materiales vermicomposteados utilizados presentaron pHs entre 6.5 y 8, y de acuerdo con Torres *et al.* (2007) esto favorece el crecimiento de las plantas y reduce la movilidad de metales pesados, por lo cual se puede suponer que los sustratos aplicados aportaron elementos nutritivos que favorecieron el desarrollo del tomate de cáscara, dado el comportamiento que se registró en el cultivo. Para los tratamientos T1, T2 y T5 el pH aumentó ligeramente, y en los tratamientos T3 y T4 esta característica disminuyó, lo cual se puede apreciar en el cuadro 8.

Macroelementos

En lo que respecta a macroelementos (N-P-K) los biosólidos vermicomposteados estudiados presentaron concentraciones elevadas de éstos (cuadro 8) los resultados obtenidos coinciden completamente con lo señalado por Salcedo-Pérez *et al.* (2007) quienes utilizaron los lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos que se destinan para la producción agrícola y forestal. Después de que los biosólidos se utilizaron como sustrato para el desarrollo del tomate de cáscara las concentraciones de estos macroelementos disminuyeron lo cual se puede asociar con su disponibilidad para ser asimilados por la especie en desarrollo.

Microelementos

La concentración de microelementos fue mayor en los tratamientos de biosólidos (T1, T2, T3, T4) en comparación con el suelo natural (T5) como se puede observar en el cuadro 8. La aplicación de residuos orgánicos como biosólidos vermicomposteados, ricos en macro y microelementos, favorecieron el establecimiento del cultivo de tomate de cáscara con diferencias significativas respecto al suelo natural, los resultados obtenidos reflejan la semejanza con lo reportado por Salcedo-Pérez *et al* (2007) al obtener mayor rendimiento de maíz cuando realizaron la aplicación de biosólidos, ricos en microelementos nutritivos, a suelos volcánicos.

Metales pesados

La concentración de los metales pesados, a excepción del plomo y exclusivamente en el tratamiento T4, como se señaló anteriormente, presentó niveles por debajo de los valores máximo permitidos establecidos por la norma mexicana y las legislaciones internacionales, como por ejemplo: la sección 503 de la EPA y la legislación de la Comunidad Europea. Y como se reportan en la literatura de diversos autores los biosólidos también presentan altas concentraciones de metales pesados (Jurado *et al.*, 2004; Hernández-Herrera *et al.*, 2005).

Variabes evaluadas en tomate de cáscara

Las semillas de tomate de cáscara germinaron entre los días 12 y 18 después de la siembra, en los sustratos de biosólidos vermicomposteados (T1-T4) y suelo natural (T5) cuadro 10. Los valores obtenidos del comportamiento de las plantas de tomate de cáscara en los biosólidos vermicomposteados (T1-T4), aunque no se registraron diferencias significativas entre tratamientos, germinaron en al menos un día de antelación con respecto al suelo natural (T5) cuadro 11.

Cuadro 10. Días de germinación, altura de planta y diámetro de tallos de tomate de cáscara en biosólidos vermicomposteados.

| T1 | | | T2 | | | T3 | | | T4 | | | T5 | | |
|----|-----|------|----|-----|------|----|-----|----|----|-----|----|----|----|-----|
| DG | AP | DT | DG | AP | DT | DG | AP | DT | DG | AP | DT | DG | AP | DT |
| 16 | 109 | 18.5 | 12 | 135 | 10 | 16 | 90 | 17 | 14 | 108 | 22 | 17 | 13 | 8 |
| 13 | 115 | 15 | 17 | 126 | 12.5 | 16 | 140 | 15 | 16 | 124 | 16 | 16 | 8 | 4.5 |
| 16 | 127 | 15 | 18 | 105 | 10.5 | 13 | 130 | 19 | 16 | 113 | 22 | 17 | 95 | 17 |
| 17 | 133 | 13 | 13 | 153 | 18 | 16 | 100 | 19 | 15 | 112 | 16 | 16 | 96 | 21 |

DG = Días de germinación; A = Altura de planta; DT = Diámetro de tallo; T1 = lodos residuales y estiércol de caballo con relación 2:1; T2 = lodos residuales; T3 = estiércol de caballo; T4 = lodos residuales y estiércol de caballo con relación 1:2; T5 = Suelo natural.

Derivado del análisis de varianza (cuadros 8.1, 8.2 y 8.3 del Apéndice) y de la prueba de comparación de medias DMS (5%) (Cuadro 11) se determinó que solamente para la variable altura de planta se registró diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) debido al efecto de los sustratos evaluados. Para esta variable los tratamientos T1 – T4 registraron alturas de planta, cuyos valores oscilaron de 114.25 a 129.75 cm, mismos que superaron en más del 50 % a la altura de planta registrado en el tratamiento T5, suelo natural. El mayor valor, para altura de planta de 129.75 cm, se registró en el tratamiento T2 que corresponde al sustrato lodos residuales vermicomposteados sin combinación con estiércol. El efecto del vermicomposteo sobre el crecimiento de las plantas es similar al reportado por Jurado *et al.* (2006).

Cuadro 11. Prueba de comparación DMS(5%) y significancia estadística para valores promedio de las variables evaluadas en tomate de cáscara. UAAAN, 2010.

| Tratamientos | DG | AP (cm) | DT (mm) |
|--------------|----------|----------|-----------|
| T1 | 15.50 ns | 121.00 a | 15.375 ns |
| T2 | 15.00 ns | 129.75 a | 12.750 ns |
| T3 | 15.25 ns | 115.00 a | 17.500 ns |
| T4 | 15.25 ns | 114.25 a | 18.875 ns |
| T5 | 16.50 ns | 53.00 b | 12.625 ns |
| CV (%) | 11.24 | 24.98 | 27.95 |

DG = Días a germinación; AP = Altura de planta; DT = Diámetro del tallo

Debido a que el tomate de cáscara no puede auto fecundarse es necesaria la presencia de organismos polinizadores (PRODUCE, 2002) durante la etapa de floración para este cultivo no se apreció la presencia de dichos organismos, mientras que en cultivos aledaños de melón y sandía la presencia de éstos fue notoria, y solamente se aproximaron al cultivo de tomate cuando dichos cultivos concluyeron su ciclo fenológico, en

consecuencia por esta situación es factible suponer que estos organismos recurrieron como última opción al tomate para satisfacer sus necesidades alimenticias, y a su vez repercutió en el retraso del amarre y cuajado de los frutos y por la tanto en el rendimiento del cultivo evaluado.

V.- CONCLUSIONES

Los materiales vermicomposteados de los tratamientos T1, T2, T3 y T4 utilizados como sustrato en el cultivo de tomate de cáscara fueron los que mostraron mayor presencia de macro y microelementos nutritivos respecto al T5. Estos materiales presentaron mayor presencia de macro y microelementos nutritivos aún después de concluir el ciclo vegetativo del tomate de cáscara.

La concentración de metales pesados en los biosólidos vermicomposteados mostró niveles por debajo de los límites permitidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 y legislaciones internacionales, y por tanto pueden ser aprovechados en usos agrícolas y forestales.

La altura del tomate de cáscara fueron significativos en los biosólidos superando en más del 50 %, respecto al suelo natural. Debido al desarrollo registrado en las plantas de tomate de cáscara y principalmente en los sustratos vermicomposteados es posible suponer que estos materiales pueden resultar adecuados para el desarrollo de especies vegetales con mayor índice de adaptación a las condiciones climáticas de la región, en virtud de que los biosólidos son una fuente orgánica viable de grandes cantidades de elementos nutritivos que pueden ser aprovechados en la

agricultura sostenible, al favorecer las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, incrementar el rendimiento de los cultivos, y reducir potencialmente el uso de los fertilizantes sintéticos. Contribuyendo además al manejo adecuado de los residuos sólidos generados en diversas actividades antropogénicas.

En términos generales el uso de los biosólidos en la agricultura es una alternativa ambiental, económica y social. Es importante considerar que la utilización de estos biosólidos puede ahorrar costos significativos así como contribuir a la preservación del ambiente y resultar beneficiosa para agricultores.

VI.- LITERATURA CITADA

- Acosta, G. Y., E. Ramírez y E. Gutiérrez S/F. "Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas." Tesis de grado: 1-20.
- Ahumada, I., O. Gudenschwager, M. A. Carrasco, G. Castillo, M. A. Sadzawka y L. Ascar 2004. "Influencia de la aplicación de biosólidos en la distribución y disponibilidad de Cu y Zn en suelos cultivados con ballica y trébol." FONDECYT: 1-8.
- Aller, M. F., M. Otero, E. Garzón y A. Morán 1999. "Utilización de biosólidos en la agricultura." Mapfre Seguridad 75: 33-43.
- Aravena, R. C., C. C. Valentin, J. M. C. Diez y A. F. Gallardo 2007. "Aplicación de lodos de plantas de tratamientos de celulosa: efecto en algunas propiedades físicas y químicas de suelos volcánicos." J. Soil Sc Nutr. 7: 1-14.
- Arthurson, V. 2008. "Proper sanitization of sewage sludge: a critical issue for a sustainable society." Appl Environ Microbiol 74: 5267-75.

- Bazaldúa-Muñoz, C., E. Ventura-Zapata, G. Salcedo-Morales, A. U. Maldonado y G. A. López 2008. "Densidad estomatal y potencial hídrico en plantas de tomate (*Physalis ixocarpa* Brot.) propagadas por cultivo de meristemas." *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14: 147-152.
- Bergkvist, P., D. Berggren y N. Jarvis 2005. "Cadmium solubility and sorption in a long-term sludge amended arable soil." *J. Environ. Qual* 34: 1530-1538.
- Caleycac, C. H. G., T. J. Cibrián, H. M. Soto y V. R. García 2007. "Aislamiento e identificación de volátiles de *Physalis Philadelphica* Lam." *Red de revistas Científicas de América Latina y el Caribe y Portugal*. 41: 337-346.
- Cardoso, V. L. 2002. "Sistema de vermiestabilización para plantas de tratamiento municipal." *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.: 1-8.
- Cardoso, V. L., C. E. Ramírez, E. V. Escalante y C. G. Moeller 2002. "I-163- Manejo de lodos residuales en México." *XXXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*: 1-7.
- Castro, R. J. C. 2005. "Estudio preliminar de aplicación de biosólidos en suelos para control de erosión y estabilización de taludes." 1-13.

CONAGUA 2009. Situación del Subsector Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento42-43

Contreras-Ramos, S. M., E. M. Escamilla-Silva y L. Dendooven 2005. "Vermicomposting of biosolids whit cow manure and oat straw." Biol. Fertil. Soils 41: 190-198.

Corona, P. S. A. 2005. "La Comarca Lagunera, constructo cultura." Universidad Iberoamericana Torreón: 17.

Cortez-Cadiz, E. d. C. 2003. "Fundamentos de ingenieria para el tratamiento de los biosolidos generados por la depuración de aguas servidas de la región metropolitana." Memoria Licenciatura.

Cota-Espericueta, A. D. y y C. Ponce-corrall 2008. "Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secador solar." Rev. Int. Contam. Ambient 24: 161-170.

Cruz-Rodrigues, V., V. C. de Alemeida-Theodoro, I. F. de Andrade, A. I. Neto, V. do Nascimento-Rodrigues y F. Villa-Alves 2003. "Producao de minhocas e composicao mineral do vermicomposto e das fezes procedentes de bubalinos e bovinos." Cienc. Agrotec. Lavras. 27: 1409-1418.

- Durán, L. y C. Henríquez 2007. "Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos." *Agronomía Costarricense* 31: 41-51.
- Elvira, C. M. 2006. "Disponibilidad de potasio aspectos relacionados a la dinámica de liberación y renovación de la solución del suelo." Sesión I. Potasio en suelos argentinos: 19-33.
- Esteller, M. V. 2002. "Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura." *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* 2: 103-113.
- Figuroa, V. U., O. M. A. Flores, R. M. Palomo, D. B. Corral y M. J. P. Flores 2008. "Uso de biosólidos estabilizados por digestión anaeróbica como fertilizante orgánico en algodónero." *Agricultura Orgánica-Agrofaz* 8: 1-10.
- Franson, M. A. H. 1992. "Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales." Ediciones Díaz de Santos: 3166-3170.
- Fuentes, D. D., D. A. Valdecantos y I. S. J. Cortina 2008. "Evaluación a medio plazo de la aplicación de biosólidos en repoblaciones forestales de *Pinus Halepensis*." *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 28: 75-80.

- Galán, H. E. y B. A. Romero 2008. "Contaminación de suelos por metales pesados." *Macia* 10: 48-60.
- Gottschall, N., M. Edwards, E. Topp, P. Bolton, M. Payne, W. E. Curnoe, B. Ball-Coelho y D. R. Lapen 2009. "Nitrogen, phosphorus, and bacteria tile and groundwater quality followong direct injection of dewatered municipal biosolids into soil." *J. Environ. Qual* 38: 1066-1075.
- Grajales, J. S., A. J. Monsalve y J. M. Castaño 2006. "Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamientos de aguas residuales de la universidad tecnologica de Pereira." *Red de revistas Cientificas de América Latina y el Caribe y Portugal*. 12: 285-290.
- Henry, J. G. y G. W. Heinke 1999. "Ingeniería ambiental." Prentice Hall Hispanoamericana S. A.: 1-778.
- Hernández-Hernández, J. L. 2009. "Modificación de las propiedades químicas de lodos residuales de MET-MEX PEÑOLES con lombrices (*Eisenia fetida*)." Tesis licenciatura UAAAN: 11-50.
- Hernández-Herrera, J. M. 2004. "Uso de lodos residuales procedentes de la ciudad de Durango y su efectos en la productividad y concentración de metales en sorgo forrajero." Tesis de grado: 12-37.

Hernández-Herrera, J. M., E. Olivares-Sáenz, I. Villanueva-Fierro, H. Rodríguez-Fuentes, R. Vázquez-Alvarado y J. F. Pissani-Zúñiga 2005. "Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare Pers.*)." Rev. int. Contam. Ambient. 21: 31-36.

INE 2006. "Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados." Instituto Nacional de Ecología: 19-21.

Jiménez, B. E. 2002. "La contaminación ambiental en México." Ed. Limusa: 1-925.

Jurado, G. P., L. M. Luna y H. R. Barreto 2004. "Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos." Técnica Pecuaria en México 42: 379-395.

Jurado, G. P., L. M. Luna, H. R. Barreto, M. M. y. Royo y C. A. Melgoza 2006. "Producción y calidad de forraje y semilla del zacate navajita con la aplicación de biosólidos en un pastizal semiárido de Jalisco." Técnica Pecuaria en México 44: 289-300.

Jurado, P., Tulio A., E. Flores, V. Olalde y J. Fría 2007. "Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrimentos del suelo y producción de forraje en pastizales semiáridos." TERRA Latinoamericana 25: 211-218.

- Larchevêque, M., V. Baldy, N. Montès, C. Fernandez, G. Bonin y C. Ballini 2006. "Short-term of sewage-sludge compost on a degraded Mediterranean soil." *Soil Sci. Soc. Am. J* 70: 1178-1188.
- López, J. y J. López 1985. "Diagnóstico de suelo y plantas." Ediciones Mundi-prensa 4º Edición: 44-45.
- Lugo de la Fuente, J., N. M. Chavez, S. B. Evangelista, P. R. Vaca, J. P. Del Aguila y R. D. Hernandez 2006. "Metales pesados totales y disponibles en suelos adicionados con lodos residuales después de 12 meses de aplicación." *Instituto literario* 100 1-8.
- Magdaleno, V. J. J., L. A. Peña, B. R. Castro, G. A. M. Castillo, S. A. Galvis, P. F. Ramírez y L. P. A. Becerra 2006. "Efecto de tres sustratos y dos colores de plásticos en el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)." *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12: 153-158.
- Mahamud, L. M., L. A. Gutiérrez y A. H. Sastre 1996a. "Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): planteamiento del problema." *Ingeniería del Agua* 3: 47-62.

Mahamud, M., A. Gutiérrez y H. Sastre 1996b. "Biosólidos generados en la depuración de aguas (II): Métodos de tratamientos." Ingeniería del Agua 3: 45-54.

Mantilla, M. G. 2010. "La experiencia mexicana en tratamiento de aguas residuales y opciones tecnológicas Retos y oportunidades." IMTA SEMARNAT: 2-3.

Marsilli, A. 2005. "Tratamientos de aguas residuales." Tierramor, revista electrónica.

Martinez-de la Cerda, J., E. Olivares-Sáenz, G. Salinas-García, F. Zavala-García y J. Aranda-Ruíz 2004. "Efecto residual del lodo en trigo (*Triticum spp.* L.)." ΦYTON: 237-242.

Mendoza, N. E. y B. M. Arca S/F. "Evaluación de métodos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en diferentes suelos del Perú." Disponible: <http://www.scribd.com/doc/25308671/Evaluacion-de-Metodos-para-la-Determinacion-de-la-CIC-de-Suelos> Recuperado: 27 de noviembre de 2010.

Moscatelli, G., I. A. Lutens y L. A. Gómez 2006. "Niveles de disponibilidad y reservas de potasio en Argentina." Sesión I. Potasio en suelos argentinos: 1-45.

Murillo, T. R. M., P. J. A. y. Barrios y C. B. Jiménez S/F. "Aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos salinos-sódicos." Disponible: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/mexico13/062.pdf> Recuperado: 28 de noviembre de 2010.: 1-13.

Oropeza-García, N. 2006. "Lodos residuales: estabilización y manejo." *Caos Conciencia* 1: 51-58.

Ozores-Hampton y J. Mendez 2010. "Uso de biosólidos en producción de hortalizas." UF University of Florida IFAS Extension Horticultural Sciences: 1-11.

Pascual, I., I. Azcona, J. Aguirreolea, F. Morales, F. J. Corpas, J. M. Palma, R. Rellan-Alvarez y M. Sanchez-Diaz 2010. "Growth, yield, and fruit quality of pepper plants amended with two sanitized sewage sludges." *J Agric Food Chem* 58: 6951-9.

Peña, L. A. 2001. "Situación actual y perspectiva de la producción y mejoramiento genético de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en México." *Revista Chapingo Serie Horticultura*: 1-10.

Pesinova, V. 2008. "Aprovechamiento de biosólidos del tratamiento de aguas residuales." *Gaceta Ide@s CONCITEG* 3: 19-22.

Pire, R. y A. Pereira 2003. "Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica." Bioagro 15: 55-63.

Premuzic, Z., J. P. Brichta, A. E. Rendina y A. F. Lorio 2002. "Parámetros de fertilidad y toxicidad para la comercialización como enmienda usando lodos del Río Matanza en Argentina." Información Tecnológica 13.

PRODUCE 2003. "Programa estratégico de necesidades de investigación y transferencia de tecnología de la cadena productiva de tomate verde en el estado de Puebla." Disponible: <http://www.cofupro.org.mx/Publicacion/Archivo/penit100.pdf>. Recuperado: 28 de septiembre de 2010.: 1-237.

Reynolds, K. A. 2002. "Tratamientos de Aguas Residuales en Latinoamérica. Identificación del Problema." Agua Latinoamericana: 1-4.

Rodriguez, F. A. A., G. P. Letón, G. R. Rosal, G. M. Dorado, F. S. y. Villar y G. J. M. Sanz 2006. "Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales." VT.

Rucks, L., F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill 2004. "Propiedades físicas del suelo." Facultad de Agronomía universidad de la república.: 2-8.

Salazar-Sosa, E., H. I. Trejo-Escareño, C. Vazquez-Vazquez y J. D. López-Martínez 2007. "Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino." *PHYTON* 76: 169-185.

Salcedo-Pérez, E., A. Vázquez-Alarcón, L. Krishnamurthy, F. Zamora-Natera, E. Hernández-Álvarez y M. R. Rodríguez 2007. "Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México." *Interciencia* 32: 115-120.

Samaras, V., C. D. Tsadilas y S. Stamatiadis 2008. "Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield, and nitrate leaching." *Agronomy Journal* 100: 477-483.

Sánchez, V. J. 2007. "Fertilidad de suelo y nutrición mineral de plantas." *FERTITEC S.A.*: 1-19.

Schroder, J. L., H. Zhang, D. Zhou, N. Basta, W. R. Raun, M. E. Payton y A. Zazulak 2008. "The effect of long term annual application of biosolids on soil properties, phosphorus, and metals." *Soil Sci. Soc. Am. J* 72: 73-82.

SEMARNAT 2003. "(Secretaria de Recursos NATurales. Normas Oficiales Mexicanas. www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/.../NOM-004-SEMARNAT-2002.pdf."

- Smith, S. R. 2009. "organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling." *Phil. Trans. R. Soc. A* 367: 4005-4041.
- Stoffella, P. J. 2005. "Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola." *Mundi-Prensa*: 1-397.
- Sukkariyah, B. F., G. Evanylo, L. Zelazny y R. L. Chaney 2005. "Cadmiun, copper, nickel, and zinc availability in a biosolids-amended piedmont soil years after application." *J. Environ. Qual.* 34: 2255-2262.
- Tian, G., T. C. Granato, R. I. Pietz, C. R. Carlson y Z. Abedin 2006. "Efect of long-term application of biosolids for land reclamation on surface water chemistry." *J. Environ. Qual* 35: 101-113.
- Torres, P., A. Pérez, J. C. Escobar, I. E. Uribe y R. Imery 2007. "Compostaje de biosólidos de plantas de tratamientos de aguas residuales." *Eng. Agric. Jaboricabal* 27: 267-275.
- Urbano, T. P. 1992. "Tratado de fitotecnia general." *Mundi-Prensa* 2 Ed.: 1-895.
- Uribe, M. H., H. G. Orozco, H. N. Chávez y V. M. S. Espino 2003. "Factibilidad económica del uso de biosólidos en el cultivo de maiz

forrajero." XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.: 1-6.

USEPA 1994. "A plain English guide to the EPA part 503 biosolids rule." U.S Environmental Protection Agency. EPA832-R-93-003.

Utria, B. E., E. I. M. Reynaldo, J. A. Cabrera, C. E. Ramos y C. A. Miranda 2007. "Aplicación de biosólidos en el cultivo de plántulas de tomate." Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias 16: 65-69.

Vélez, Z. J. A. 2007. "Los biosólidos: ¿una solución o un problema?" Producción + Limpia 2: 57-71.

VII.- ÁPENDICE

7.1 Altura de planta

| FV | GL | SC | CM | F | P>F |
|--------------|----|--------------|-------------|--------|-------|
| TRATAMIENTOS | 4 | 14981.296875 | 3745.324219 | 5.2833 | 0.008 |
| ERROR | 15 | 10633.500000 | 708.900024 | | |
| TOTAL | 19 | 25614.796875 | | | |

C.V. = 24.98%

7.2 Diámetro de tallo

| FV | GL | SC | CM | F | P>F |
|--------------|----|------------|-----------|--------|--------|
| TRATAMIENTOS | 4 | 128.325195 | 32.081299 | 1.7209 | 0.0197 |
| ERROR | 15 | 279.625 | 18.641666 | | |
| TOTAL | 19 | 407.950195 | | | |

C.V. = 27.95 %

7.3 Días de germinación

| FV | GL | SC | CM | F | P>F |
|--------------|----|-----------|----------|--------|-------|
| TRATAMIENTOS | 4 | 5.500000 | 1.375000 | 0.4533 | 0.770 |
| ERROR | 15 | 45.500000 | 3.033333 | | |
| TOTAL | 19 | 51.000000 | | | |

C.V. = 11.24 %