

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**VERMICOMPOSTEO DE BIOSÓLIDOS
CON LOMBRIZ (*Eisenia fetida*)**

**POR:
ELIZABETH MEDINA ACOSTA**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA. DICIEMBRE DEL 2005

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

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

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR EL JURADO

PRESIDENTE



MG. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ

VOCAL




DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

VOCAL



MC. MA. DEL CARMEN POTISEK TALAVERA

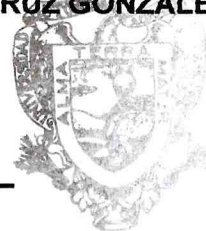
VOCAL SUPLENTE



ING. DANIEL CRUZ GONZÁLEZ



**MC. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE
CARRERAS AGRONÓMICAS**



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA. DICIEMBRE DEL 2005

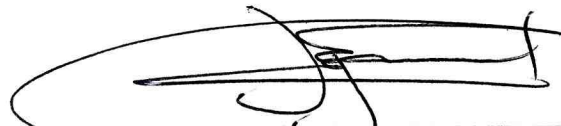
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

**VERMICOMPOSTEO DE BIOSÓLIDOS CON
LOMBRIZ (*Eisenia fetida*)**

ASESOR PRINCIPAL



MC. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ

ASESOR




DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

ASESOR



MC. MA. DEL CARMEN POTISEK TALAVERA

ASESOR



ING. DANIEL CRUZ GONZÁLEZ



MC. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE
CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA. DICIEMBRE DEL 2005

AGRADECIMIENTOS

A Dios que me permite llegar a este momento de mi vida.

A la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", por brindarme la oportunidad de tener una profesión.

A mis asesores:

MC Alejandro Moreno Reséndez

Dr. José Luis Reyes Carrillo

MC. Ma. del Carmen Potisek Talavera

Ing. Quím. Elba Margarita Aguilar Medrano

Ing. Quím. Daniel Cruz González.

Por compartirme su valiosa experiencia, su tiempo, su amistad y su apoyo durante la realización de este proyecto.

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECyT) por su apoyo económico a través de la Beca Tesis de Licenciatura.

DEDICATORIA

A mis padres, Sr. Jorge Luis Medina Muro y Sra. María de los Ángeles Acosta Marines.

Por ser el mejor ejemplo de esfuerzo, trabajo, nobleza, honestidad y superación. Todo mi respeto y cariño para ellos.

A mis hermanos, Memé, Laurita y Chocho; mis sobrinos Beto y Calitosh.

Por su apoyo, cariño, comprensión y por aguantarme con una sonrisa siempre.

A todos mis amigos y amigas: Azul, Erika, Mony, Pera, Vero, Ydalid, Agus, Arturo, César, Gera, Goyo, Jaime, Peña, Raúl (q.e.p.d.), en fin.

Por la fortuna de contar con su amistad sincera durante estos años.

A Julián Carillo Reyes, mi sexto asesor, mi mejor amigo, mi compañero inseparable, mi bendición, mi guía, mi buena suerte, mi apoyo, mi otro yo, mi amor, mi todo.

Gracias por estar a mi lado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Hipótesis.....	3
II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Proceso De Tratamiento De Aguas Residuales.....	5
2.2 Generación de Biosólidos.....	6
2.3 Alternativas De Tratamiento De Biosólidos.....	7
2.3.1 Tratamientos Físicos.....	9
2.3.2 Tratamientos Químicos.....	9
2.3.3 Tratamientos Térmicos.....	10
2.3.4 Tratamiento Biológico.....	11
2.4 El Vermicomposteo.....	12
2.4.1 Etapas del Vermicomposteo.....	13
2.4.2 Sobrevivencia y Reproducción de la Lombriz Eisenia fetida.....	14
2.4.3 Vermicomposteo de Biosólidos.....	15
2.5 Características Químicas de la Vermicomposta.....	16
2.5.1 pH.....	16
2.5.2 Conductividad Eléctrica (CE).....	17
2.5.3 Capacidad De Intercambio Catiónico (CIC).....	17
2.5.4 Materia Orgánica (MO).....	18
2.5.5 Relación Carbono:Nitrógeno (C:N).....	18
III.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1 Materiales y Organismos Utilizados.....	19
3.1.1 Biosólidos.....	19
3.1.2 Estiércol.....	19
3.1.3 Lombrices.....	19
3.1.4 Unidad Experimental.....	20
3.1.5 Sustratos.....	20
3.2 Métodos.....	21
3.2.1 Manejo De Tratamientos.....	21
3.2.2 Muestreo.....	21
3.2.3 Metodología del Análisis Químico.....	21
IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
4.1 Dinámica del pH en los sustratos vermicomposteados.....	26
4.2 Dinámica de la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos vermicomposteados.....	27
4.3 Dinámica de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en los sustratos vermicomposteados.....	28

4.4 Dinámica de la Materia Orgánica en los sustratos vermicomposteados	29
4.5 Dinámica de la Relación Carbono:Nitrógeno en los sustratos vermicomposteados	30
4.6 Conteo Final de E. fetida en los Sustratos Vermicomposteados	32
V.- CONCLUSIONES	33
VI.- RESUMEN	34
VIII.- LITERATURA CITADA	36
APÉNDICE A. RESULTADOS POR TRATAMIENTO Y ECUACIONES DE REGRESIÓN	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

1	Limites Máximos Permisibles para Patógenos y Parásitos en Lodos y Biosólidos	8
2	Aprovechamiento de biosólidos	8
3	Composición de los sustratos vermicomposteados con lombriz <i>E. fetida</i> .	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura

1	Comportamiento del pH durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	26
2	Comportamiento de la CE durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	28
3	Comportamiento de la CIC durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	29
4	Comportamiento de la MO durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	30
5	Comportamiento de la relación C:N durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	31
6	Conteo final de poblaciones de <i>E. fetida</i> en los sustratos vermicomposteados	32

I.- INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales en México se ha incrementado notablemente en los últimos años. De acuerdo con estadísticas de la Comisión Nacional del Agua (CNA), en el año 2003 trabajaron 938 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) a nivel nacional. El mismo año, en la Comarca Lagunera se encontraban establecidas 83 PTAR, de las cuales 78 estaban en funcionamiento con un gasto instalado de 3840.76 L s^{-1} y un gasto tratado de $24\ 000 \text{ L s}^{-1}$ aproximadamente (CNA, 2003). En relación al sector industrial, cabe señalar que La Laguna cuenta actualmente con 15 parques industriales, que engloban poco más de 871 empresas demandantes de una gran cantidad de agua. Por lo tanto, las PTAR cobran cada día mayor importancia (DGDE, 2004).

Durante su proceso, las PTAR generan un subproducto llamado "lodo", que es un sólido de color oscuro y cuyo contenido de humedad es variable. En nuestro país, cuando estos lodos cumplen con la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (Protección Ambiental.-Lodos y Biosólidos- Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y disposición Final) (DOF, 2003), se les conoce como "biosólido" o en otros países como "sewage sludge" o "biosolid" (Jurado-Guerra *et al.*, 2004).

La situación que enfrentan estos lodos como residuo, es que representan un problema y también una oportunidad. En términos del problema, los lodos residuales contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, metales pesados y organismos patógenos, que afectan la salud humana mediante exposición directa o a través de los alimentos derivados de las cosechas y el ganado; por lo que lo que el traslado y disposición de los mismos implica un gasto para los municipios (Smernik *et al.*, 2003). Sin embargo, desde el punto de vista de la oportunidad, son ricos en elementos nutritivos como nitrógeno, fósforo y materia

orgánica; por lo que pueden mejorar la productividad y fertilidad de los suelos agrícolas, como alternativa de disposición final.

En nuestro país, en el año 2004, sólo el 27% del total de las aguas residuales municipales fueron tratadas, generando aproximadamente 3,900 ton día⁻¹ de lodos residuales (CNA, 2004).

Sin embargo, la mayor parte de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales instalados en Latinoamérica no incluyen el manejo y disposición de los lodos residuales que generan. En la actualidad, los métodos de disposición utilizados son esencialmente basureros a cielo abierto, los rellenos sanitarios, el confinamiento controlado o la incineración. Esto provoca contaminación ambiental debido a los altos contenidos de organismos patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos que presentan los lodos no estabilizados (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Para facilitar su manejo y evitar posibles problemas con el olor, los agentes patógenos y el contenido de compuestos tóxicos, los lodos residuales deben ser tratados. En este sentido, existen diferentes métodos para su tratamiento como la estabilización alcalina, la digestión aeróbica y anaeróbica o el composteo (EPA, 2000). Este último proceso comúnmente es utilizado para el tratamiento de residuos orgánicos o para la producción de fertilizantes orgánicos (Godden *et al.*, 1986; Baca *et al.*, 1992; Inbar *et al.*, 1993; Eghball *et al.*, 1997; Ndewga y Thompson, 2001).

Recientemente se ha mostrado interés en el desarrollo de procesos basados en la utilización de sistemas biológicos (Williams, 1999; Bardi *et al.*, 2000; Nocentini *et al.*, 2000). Un ejemplo de estos sistemas es la crianza de lombrices (vermicultura o lombricultura) para estabilizar diversos residuos orgánicos a través del vermicomposteo (Eastman, 1999; Frederickson *et al.*, 1997; Ndewga y Thompson, 2001). El vermicomposteo consiste en aprovechar la capacidad de adaptación y reproducción de organismos como las lombrices *Eisenia fetida* (Savigny), *Eisenia andrei* (Bouché) o *Eudrilus eugeniae* (Kinberg), que se caracterizan por tener un apetito voraz y una alta tasa de crecimiento fuera de su hábitat natural, acelerando la descomposición de residuos orgánicos (Aslama *et al.*, 1999; Jordan *et al.*, 1999; Atiyeh *et al.*, 2000; Gajalakshmi *et al.*, 2001).

- La investigación sobre el potencial del vermicomposteo de lodos residuales data de 1970; esta tecnología fue llamada también vermiestabilización. En ese entonces se demostró, a escala de laboratorio, que los lodos residuales podían emplearse como sustrato de la lombriz *E. fetida*, además de que en el proceso, el lodo se estabiliza aproximadamente tres veces más rápido que el lodo no vermicompostado y que los olores inaceptables desaparecen rápidamente (Neuhauser *et al.*, 1988; Blackemore, 1995; Naddafi *et al.*, 2004).

En la actualidad, el empleo de lombrices en el manejo de biosólidos se lleva a cabo en Estados Unidos, Europa, Nueva Zelanda y Australia (Blackemore, 1995; Cameron *et al.*, 2004). Sin embargo, aunque el vermicomposteo es una tecnología innovadora en el tratamiento de lodos residuales en México, existen experiencias en el tratamiento de basura orgánica y residuos de café (Aranda *et al.*, 1999; Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Habiendo establecido lo anterior, en este trabajo se cubrieron los siguientes objetivos:

1.1 Objetivos

- Emplear la técnica de vermicomposteo para el tratamiento de biosólidos generados por una Planta de Tratamientos de Aguas Residuales.
- Determinar el comportamiento de las propiedades químicas (pH, Conductividad Eléctrica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Materia Orgánica y Relación Carbono:Nitrógeno) de los sustratos vermicompostados con lombriz *Eisenia fetida* en tres tratamientos.

1.2 Hipótesis

- Los biosólidos generados por una planta de tratamiento de aguas pueden ser vermicompostados con lombriz *Eisenia fetida*.

- Las lombrices *Eisenia fetida* presentan una alta tasa de reproducción en mezclas que contienen biosólidos, por su capacidad de habitar sustratos con alto contenido de materia orgánica.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Proceso De Tratamiento De Aguas Residuales

Las aguas de desecho que se generan en áreas urbanas, residenciales o comerciales, y que fueron utilizadas en operaciones de lavado, en servicios sanitarios u otro uso doméstico, son llamadas "*aguas residuales municipales*". En algunos casos, estas aguas incluyen efluentes de origen industrial con cierto grado de tratamiento, mismo que les permita descargar en el sistema de drenaje municipal (Serrano-Espinosa, 1997).

El tratamiento convencional para el manejo de aguas residuales municipales comprende tratamiento preliminar, primario y secundario. El tratamiento terciario se lleva a cabo para obtener un efluente de alta calidad. Las etapas de los tratamientos anteriores se describen a continuación (Metcalf y Eddy, 1996; Serrano-Espinosa, 1997; Kiely, 1999):

- En el tratamiento preliminar, las aguas crudas son cribadas para la remoción de objetos de tamaño considerable como madera, botellas, papel o tela. En esta etapa también se retienen sólidos inorgánicos finos, arena, piedras y arcillas.
- El tratamiento primario involucra operaciones de sedimentación por gravedad y flotación, que remueven aproximadamente la mitad de los materiales sólidos presentes en el afluente. El material sólido orgánico e inorgánico que fue retenido es arrastrado al fondo y retirado del proceso, pues constituye el lodo primario junto con el material sobrenadante (aceites, grasas, madera y residuos vegetales).
- El tratamiento secundario puede considerarse como un proceso de fermentación, en el cual una población microbiana utiliza la materia orgánica

presente en el afluente como fuente de carbono y energía para su crecimiento y supervivencia. Los objetivos de esta etapa son la coagulación y la eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables, así como la estabilización de la materia orgánica extraída durante la depuración del afluente y los sólidos suspendidos que no han sido separados en la etapa de tratamiento primario.

- El tratamiento terciario emplea la filtración con grava y carbón para la remoción de sólidos persistentes en el afluente; mientras que los procesos de membrana, como la ósmosis inversa o la nanofiltración, se emplean en la eliminación de compuestos orgánicos, pesticidas y elementos traza. La desinfección se realiza comúnmente mediante clorinación o radiación ultravioleta (UV).

2.2 Generación de Biosólidos

El manejo de las aguas residuales implica la separación de las sustancias contaminantes contenidas en éstas, obteniéndose un efluente líquido y una fracción de sólidos. Sin embargo, esta separación no es completa: por una parte la fracción de agua mantiene ciertos niveles de sólidos suspendidos y sustancias disueltas, mientras que los lodos se caracterizan por un contenido elevado de agua. De este modo, los lodos se originan como un subproducto residual del tratamiento de las aguas (Metcalf y Eddy, 1996; Cortez-Cádiz, 2003).

El sistema de tratamiento aerobio es el más común para el tratamiento de aguas residuales, debido a que resisten variaciones amplias en la composición del efluente; sin embargo, el principal problema que se presenta en esta clase de tratamiento es la gran cantidad de lodos y biosólidos que se generan (Kiely, 1999). Al respecto, es conveniente tener presente que el término "biosólido" es una definición establecida por la EPA (2000) para potencializar el aspecto de residuo biológico con posibilidades de reutilización que presentan los lodos secundarios.

En los sistemas de tratamiento aerobios intervienen no sólo microorganismos quimioheterótrofos (como bacterias y hongos), sino también predadores (como los protozoos) que utilizan la masa microbiana como fuente de elementos nutritivos.

Dentro de la población bacteriana se encuentran principalmente las bacterias floculantes (por ejemplo *Zooglea sp.*), que segregan polisacáridos esenciales para una buena separación de biomasa en el sedimentador, luego de la etapa de depuración biológica (Metcalf y Eddy, 1996).

Los tratamientos aerobios se pueden clasificar en tratamientos con biomasa suspendida y con biomasa fija. Entre los sistemas de tratamiento con biomasa suspendida se encuentran los lodos activados y las lagunas aireadas, y entre los de biomasa fija se encuentran los filtros aerobios y los tambores biológicos de contacto rotatorio. El principio básico de estos sistemas es el siguiente: después de un tiempo suficiente de contacto entre la biomasa y el efluente, el licor de mezcla se envía a un clarificador destinado a separar el agua depurada de los biosólidos, desde donde un cierto porcentaje de este último es recirculado al reactor para mantener su concentración de biomasa activa elevada. La biomasa residual, que es el lodo activado que no es recirculado al reactor, son los llamados lodos residuales. Estos lodos se purgan del sistema y, de cumplir con las especificaciones de la normatividad vigente, les da el nombre de *biosólidos* (Metcalf y Eddy, 1996; Serrano, 1997).

2.3 Alternativas De Tratamiento De Biosólidos

De acuerdo con la Norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales 40 CFR (*Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge*) (EPA, 2000), y con la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, se requiere que los sólidos de las aguas residuales sean declarados "*no peligrosos*" en base al análisis CRETIB de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2003 (Características de los Residuos Peligrosos, el Listado de Los Mismos y los Límites que hacen a un Residuo Peligroso Por Su Toxicidad al Ambiente). En otras palabras, los lodos residuales son tratados adicionalmente porque se pretende incorporarlos al suelo como abono orgánico o bien, para disponerlos sin comprometer la salud pública y el medio ambiente (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Al respecto, la NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las siguientes clasificaciones para el aprovechamiento de biosólidos:

Cuadro 1. Límites Máximos Permisibles para Patógenos y Parásitos en Lodos y Biosólidos

Clase	Indicador Bacteriológico de Contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP*g ⁻¹ en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP*g ⁻¹ base seca	Huevos de helmintos g ⁻¹ en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(a ^{**})
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

*Número Más Probable

**Huevos de helmintos viables

Cuadro 2. Aprovechamiento de biosólidos.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	-Usos urbanos con contacto directo durante su aplicación. -Los establecidos para la clase B y C.
Excelente o Bueno	B	-Usos urbanos sin contacto directo durante su aplicación. -Los establecidos para la clase B y C.
Excelente o Bueno	C	-Usos forestales -Mejoramiento de suelos -Usos agrícolas.

Las diferentes alternativas para el tratamiento de lodos residuales facilitan su manejo y reducen los costos derivados de la generación de este residuo. Estas alternativas de tratamiento se clasifican en métodos físicos, químicos, térmicos y biológicos (Serrano, 1997; Kiely, 1999; EPA, 2000; Cortez-Cádiz, 2003).

2.3.1 Tratamientos Físicos

- Espesamiento

El espesamiento se emplea para concentrar el contenido sólidos del lodo 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 filtros de banda por gravedad (Kiely, 1999).

- Desecado

El desecado consiste en la remoción de agua de los lodos 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 (EPA, 2000).

2.3.2 Tratamientos Químicos

-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 a la liberación del agua absorbida, por lo cual se efectúa antes de las operaciones de deshidratación. Entre los productos químicos más utilizados se encuentran el cloruro férrico, la cal, la alúmina y polímeros orgánicos. Su dosificación debe ser en forma líquida, con lo cual algunos reactivos requieren ser previamente disueltos antes de ser incorporados (Metcalf y Eddy, 1996; EPA, 2000).

-Estabilización con Óxido de Calcio o Cal.

La estabilización con cal consiste básicamente en aumentar y mantener los lodos a pH 12 mediante la adición de cal. Como 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 (pretratamiento con cal) y otro

después de ella (postratamiento con cal). Para la estabilización se suele utilizar cal viva y cal hidratada (EPA, 2000; Cortez-Cádiz, 2003) .

2.3.3 Tratamientos Térmicos

- Secado térmico.

Este proceso permite eliminar el agua mediante la aplicación de calor externo. El producto resultante contiene prácticamente todo el material sólidos y su contenido de humedad es del orden del 5% al 10% (Jiménez-Cisneros, 2002).

- Incineración

Es el proceso térmico en que se realiza una oxidación química 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 (Metcalf y Eddy, 1996; Jiménez-Cisneros, 2002).

- Cristalización por congelamiento.

Es el proceso donde se produce una separación del agua congelando los lodos (Kiely, 1999; Cortez-Cádiz, 2003).

- Oxidación por vía húmeda.

Es un proceso que consiste en la oxidación del lodo crudo por vía húmeda a presión y temperatura elevadas (entre 175 a 315°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 siendo enfriados (Kiely, 1999; Jiménez, 2002).

- Pasteurización

Consiste en un tratamiento térmico 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 (Jiménez, 2002).

2.3.4 Tratamiento Biológico

- Digestión anaeróbica.

Es uno de los procesos mas utilizados, en el que la degradación de la materia orgánica e inorgánica ocurre en ausencia de oxígeno y genera biogas. Existen diversos métodos de digestión anaerobia (Metcalf y Eddy, 1996; Serrano-Espinosa, 1997; Cortez-Cádiz, 2003):

- Digestión Convencional: se realiza en el intervalo mesófilo de temperaturas, es decir, entre los 30 y 38°C.
- Digestión de una fase y carga alta: este proceso difiere del anterior porque la carga de sólidos en el lodo es mucho mayor y no se produce una separación de biosólidos y sobrenadante.
- Digestión en dos fases: consiste en una acción combinada entre un digester de alta carga y un estanque, que sirve para almacenar los lodos bombeados del digester de carga alta y para concentrar los lodos digeridos, formando un sobrenadante clarificado.
- Digestión anaeróbica termófila: se produce a temperaturas situadas entre los 49 y 57°C, proporcionando condiciones adecuadas para la actividad de bacterias termofilicas.

- Digestión aeróbica.

Corresponde a la estabilización de la materia orgánica mediante el suministro de aire (oxígeno), obteniéndose como producto anhídrido carbónico (CO₂), amoniac (NH₃) y agua (no genera biogás). Es aplicable a biosólidos, mezclas de biosólidos con lodos primarios y lodos no desarenados (Serrano, 1997; Cortez-Cádiz, 2003).

- Composteo

El composteo consiste en una bio-oxidación acelerada de la materia orgánica, en la que se incluye una etapa termofílica (45-65°C) a través de la cual los microorganismos participantes liberan calor, dióxido de carbono y agua (Godden *et al.*, 1986; Domínguez *et al.*, 1997; Cameron *et al.*, 2004).

Sin embargo, recientemente se ha generado interés por emplear un método de composteo relacionado con el proceso de estabilización de residuos orgánicos que no incluye la etapa termofílica, pero que involucra el uso de lombrices para

descomponer y estabilizar los residuos orgánicos. Este método es el vermicomposteo (Atiyeh *et al.*, 2000).

-Vermicomposteo

El término *vermicomposteo* se refiere al uso de lombrices para compostear residuos orgánicos. Se trata de un proceso de descomposición aerobio de biooxidación y estabilización no termofílica de desechos orgánicos, que depende de las lombrices de tierra para fragmentar, mezclar y promover la actividad microbiana (Nogales *et al.*, 1999; Ndeuga y Thompson, 2001; Gunadi *et al.*, 2002).

2.4 El Vermicomposteo

Entre las diferentes tecnologías de estabilización de residuos orgánicos se encuentra el vermicompostaje, que ha sido ya propuesto como una ecobiotecnología de bajo coste capaz de estabilizar diferentes tipos de residuos (Baca *et al.*, 1992; Elvira *et al.*, 1998).

El vermicompostaje se basa en el aprovechamiento de la habilidad de algunas lombrices epigeas (que viven en la superficie del suelo) para consumir un amplio rango de residuos orgánicos de origen animal, vegetal y urbano. Esta habilidad ya ha sido comprobada ampliamente en estiércol de diferentes animales como cerdo, conejo, caballo, oveja, gallina, pato y vaca; en restos de cosechas y podas; así como en periódico, restos de comida y lodos provenientes de tratamiento de aguas residuales (Mitchell *et al.*, 1980; Chan y Griffiths, 1988; Huhnta y Haimi, 1988; Hartenstein y Bisesi 1989; Elvira *et al.*, 1998; Capristán *et al.*, 1999; Gajalakshmi *et al.*, 2001; Ndeuga y Thompson, 2001; Gunadi *et al.*, 2002; Naadafi *et al.*, 2004).

Durante su alimentación, la lombriz fragmenta el residuo orgánico, mejora la actividad microbiana e incrementa la tasa de descomposición del material, con lo que la materia orgánica inestable se humidifica, siendo oxidada y estabilizada. Además, las lombrices reducen el número de patógenos y se obtiene el mismo efecto que en el composteo tradicional (Inbar *et al.*, 1985; Elvira *et al.*, 1998).

Las dos principales ventajas del vermicomposteo como método para el tratamiento de residuos son: a) la reducción de patógenos en el residuo por parte de la lombriz, sin pasar por la etapa termofílica del composteo tradicional; pues dicha etapa reduce el potencial nutritivo de la composta; y b) la posibilidad de convertir un residuo orgánico en un abono orgánico, contribuyendo con ello a la reducción de la problemática que presentan algunos residuos de origen urbano, como los biosólidos (Atiyeh *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2000; Ndeuga y Thompson, 2001; Santamaría-Romero *et al.*, 2001).

2.4.1 Etapas del Vermicomposteo

Las etapas del proceso general de vermicomposteo son: selección de los materiales, mezclado y reducción de tamaño, pre-composteo, digestión, recolección y almacenamiento. A continuación se describe cada una de ellas (Capistrán *et al.*, 1999).

- 1) Selección de los materiales. Puede considerarse cualquier residuo orgánico como periódico, aserrín, restos de comida, etc. Los materiales son llevados al recipiente, caja o lecho donde se llevará a cabo el proceso de vermicomposteo.
- 2) Mezclado y reducción de tamaño. Los materiales se mezclan para su homogenización, procurando guardar entre ellos una proporción del volumen que puede medirse con algún recipiente u otra escala. En esta etapa los materiales se trituran, se muelen o se rompen, lo que facilitará su incorporación a la mezcla.
- 3) Pre-composteo. Después de ser mezclado, el material experimenta un periodo de intensa actividad microbiana que genera temperaturas superiores a los 38°C dentro del lecho o recipiente. Para reducir este aumento de temperatura, se recomienda sacar unos días el material de su recipiente o lecho para que se enfríe a temperatura ambiente.
- 4) Digestión. La degradación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante digestión enzimática, enriquecimiento de nitrógeno de los excrementos y el transporte de materiales orgánicos e inorgánicos. La lombriz fragmenta el material degradado, lo que incrementa el área de acción y la aireación;

mientras el material es mezclado con las secreciones de la mucosa intestinal y los microbios, para convertirse en vermicomposta.

- 5) **Recolección.** El material procesado por las lombrices (vermicomposta) se va extrayendo del recipiente o lecho, empezando por el que esté en el fondo. Este material aún tiene lombrices, por lo que hay que retirarlas del material con cuidado y depositarlas en otro sustrato. Finalmente, la vermicomposta se seca a temperatura ambiente

El producto final, conocido también como “*vermicomposta*”, “*vermicompost*” o “*vermicast*” y que fue obtenido de los residuos orgánicos que atravesaron el intestino de la lombriz, es bastante diferente del material a partir del cual se generó la vermicomposta (Domínguez *et al.*, 1997). En términos generales, una descripción de la vermicomposta sería la siguiente (Eastman, 1999; Gajalakshmi *et al.*, 2001) :

Es un material oscuro, con una elevada carga enzimática y bacteriana que lo estabiliza contra la fermentación o putrefacción; aumenta la solubilidad de los elementos nutritivos, evita su lixiviación con los riegos y los mantiene disponibles por más tiempo en el suelo, liberándolos paulatinamente. Se puede utilizar sin inconvenientes en estado natural y se encuentra libre de parásitos como los nematodos. Posee pH neutro. Incrementa también la superficie activa de las partículas minerales y con ello, la CIC. Los ácidos húmicos y flúvicos que contiene regeneran las características químicas del suelo. Mejora las características estructurales del terreno y también amortigua el efecto de los compuestos químicos aplicados al suelo. Aumenta la retención hídrica de los suelos (4-27%) y disminuye el consumo de agua por los cultivos.

2.4.2 Supervivencia y Reproducción de la Lombriz *Eisenia fetida*

Entre las lombrices con mayor índice de crecimiento y fecundidad, destaca la lombriz de tierra epigea *Eisenia fetida*; conocida también como “*Lombriz del Estiércol*” o “*Lombriz Tigre*”. Esta especie de anélidos es la más utilizada en el vermicomposteo debido a su rápida adaptación a los residuos orgánicos, la amplia capacidad reproductiva que presenta durante todo el año y su resistencia a variaciones importantes de humedad y temperatura (Mitchell *et al.*, 1980; Huhnta y Haimi, 1988; Capristán *et al.*, 1999; Gunadi *et al.*, 2002; Gunadi y Edwards, 2003).

El principal sustrato de *E. fetida* es el estiércol de diferentes animales como cerdo, conejo, caballo, gallina, oveja, pato y vaca (Frederickson, 1997; Gunadi, 2002). Sin embargo, este anélido también se ha adaptado a sustratos de residuos vegetales como restos de cosechas de papa y café, así como podas de pasto y malezas (Frederickson *et al.*, 1997; Aranda *et al.*, 1999; Gunadi *et al.*, 1998).

Cuando alcanza la madurez sexual, *E. fetida* desarrolla un anillo mucoso de mayor diámetro que el resto del cuerpo, llamado clitelo, cuyas glándulas producen la cubierta del capullo y el alimento para nutrir a las crías que están en su interior. Cada lombriz está dotada de un aparato genital masculino y de un aparato genital femenino. El aparato genital femenino recibe el esperma y lo retiene hasta el momento de la fecundación, misma que se efectúa a través del clitelo. La capacidad reproductiva de una lombriz roja adulta es de hasta 3 capullos por semana, pudiendo contener de 1 a 4 lombrices cada capullo. Así, la población de lombrices puede llegar a duplicarse cada día. Las lombrices permanecen en su capullo durante 3 semanas y una vez fuera de él, se convierten en adultas a las 6 semanas (Butt, 1999; Capistrán *et al.*, 1999; St-Pierré *et al.*, 1999; Gunadi, 2002).

La lombriz común no es recomendable para el composteo de los residuos orgánicos ya que, a diferencia de *E. fetida*, suele cavar galerías verticales, vive a más de 100 cm de profundidad, deposita sus deyecciones sobre la superficie terrestre, es menos prolífica, se reproduce únicamente en el verano, y de cada capullo nace solamente una lombriz (Blackemore, 1995).

2.4.3 Vermicomposteo de Biosólidos

La EPA (2000) ha definido la estabilización de los biosólidos como la eliminación de olores indeseables, la reducción de patógenos (como bacterias y virus) y vectores de enfermedades (roedores, moscas), así como disminuir la concentración de toxinas biodegradables (hidrocarburos, pesticidas) y metales pesados como el cromo, mercurio, níquel, antimonio, bismuto, plomo y zinc.

Durante el proceso de vermicomposteo, *E. fetida* facilita la estabilización de los biosólidos a consecuencia de su actividad, pues con sus galerías mantiene la

aeración necesaria para la salida de dióxido de carbono y entrada de oxígeno, con lo que se eliminan los olores indeseables. Estas condiciones aeróbicas son necesarias para que los diversos microorganismos presentes lleven a cabo la biooxidación del sustrato (Hunhta y Haimi, 1988; Capristán *et al.*, 1999; Ndegwa *et al.*, 2000). Además, la lombriz se adapta rápidamente al residuo para colonizarlo, e incrementar con ello el grado de estabilización del mismo comparado con los métodos tradicionales de composteo (Blackemore, 1995).

Algunas especies de lombrices, como la propia *E. fetida*, tienen la capacidad de tolerar altas concentraciones de toxinas y metales pesados, inmovilizándolos en las paredes de su intestino. Luego, los metales son transferidos a las glándulas calcíferas que posee la lombriz, donde son regulados bioquímicamente y excretados a una concentración menor que la inicial. En estas glándulas también se lleva a cabo la regulación de pH de los biosólidos. Del mismo modo, las lombrices son capaces de eliminar microorganismos patógenos y parásitos presentes en los biosólidos, pues cuando el residuo atraviesa su intestino, los microorganismos degradadores ahí presentes reducen las poblaciones de bacterias como *Salmonella spp.* y *Escherichia coli*, al igual que esporas y quistes de otros parásitos (Blackemore, 1995; Capristán *et al.*, 1999; Eastman, 1999; Labrot *et al.*, 1999; Reinecke *et al.*, 1999; Krauss *et al.*, 2000; Morrison *et al.*, 2000; Peredney y Williams, 2000; Zhang *et al.*, 2000; Gunadi *et al.*, 2002; Gunadi y Edwards, 2003).

Cabe mencionar que la EPA (2000) ha clasificado la vermicomposta de biosólidos como de Clase A, es decir, "De Alta Calidad" (*Exceptional Quality*) debido a la disminución de patógenos que presenta y a su estabilidad, misma que le permite cumplir con los estándares de la Norma 503. Esta clasificación permite la aplicación de la vermicomposta de biosólidos al suelo sin ninguna restricción.

2.5 Características Químicas de la Vermicomposta

2.5.1 pH

Durante el vermicomposteo, la mayoría de los residuos orgánicos empleados como sustrato tienden a acidificarse. Debido a que las lombrices son sensibles a las fluctuaciones de acidez, el pH debe mantenerse entre 5 y 9 para su supervivencia.

En términos de la vermicomposta, cabe resaltar que el pH desempeña un papel fundamental para la solubilidad y la disponibilidad de los metales pesados. De manera general, el incremento en el pH del suelo disminuye la disponibilidad de los metales por medio de reacciones de precipitación o adsorción. Además, varios nutrientes se ven afectados por el pH del medio en que se encuentren; los más importantes son el fósforo y la mayoría de los micronutrientes, especialmente hierro, manganeso, cobre, zinc, y boro; cuya solubilidad disminuye en pH básico (Capristán *et al.*, 1999; Mantovani, 2004).

2.5.2 Conductividad Eléctrica (CE)

La Conductividad Eléctrica de un suelo o sustrato es la medición su salinidad relativa o el promedio de las sales solubles presentes en mS cm^{-1} . Estas sales solubles presentes como calcio, magnesio, potasio, sodio, cloruros, nitratos y fosfatos, controlan la presión osmótica de la solución del suelo; si se encuentran en altas concentraciones provocan condiciones adversas para el desarrollo de las plantas, principalmente debido al aumento de la presión osmótica de la solución del suelo. Según la teoría de la sequedad fisiológica, esto implica mayor gasto de energía de la planta para la obtención del agua y sufren desecamiento; o bien, su altura se reduce considerablemente, aunque exista una humedad elevada. Por lo tanto, la conductividad eléctrica es el parámetro más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad en el suelo (Capristán *et al.*, 1999; García y Dorronsoro, 1999; De Bertoldi y Schnappinger, 2001).

2.5.3 Capacidad De Intercambio Catiónico (CIC)

La Capacidad de Intercambio Catiónico es el número de cationes disponibles en una cantidad de suelo, expresado en miliequivalentes 100 g^{-1} . Estos cationes son elementos nutritivos como aluminio, magnesio, potasio, sodio y calcio; cuya concentración depende de la cantidad de materia orgánica presente en el sustrato. Un incremento en la CIC puede traducirse como un aumento en la cantidad de elementos disponibles en la vermicomposta, así como en su fertilidad y contenido de materia orgánica (Capristán *et al.*, 1999; De Bertoldi y Schnappinger, 2001; Mantovani, 2004).

2.5.4 Materia Orgánica (MO)

El porcentaje de materia orgánica presente en la vermicomposta está estrechamente vinculado con su fertilidad, ya que influye en la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Los principales elementos nutritivos como el nitrógeno, el azufre y el boro, se derivan casi totalmente de la materia orgánica en descomposición. La fracción de la materia orgánica más resistente a esta descomposición es llamada *humus*, compuesta principalmente por lignina, aminoácidos, carbohidratos, celulosa, grasas y resinas. Aproximadamente, el 56% del humus es carbón, el 35% oxígeno, el 3.5% hidrógeno y el 5% nitrógeno. Su coloración es casi negra, de un olor fresco y de estructura parecida al suelo (Capristán *et al.*, 1999; De Bertoldi y Schnappinger, 2001).

2.5.5 Relación Carbono:Nitrógeno (C:N)

La relación C:N es de suma importancia para el desarrollo de la población microbiana presente en el vermicomposteo. Su disminución durante el composteo se debe al consumo de carbono y nitrógeno por parte de la población microbiana presente en el proceso; lo que puede interpretarse como un aumento en el grado de fermentación del residuo orgánico. El carbono proporciona la energía necesaria para el crecimiento de los microorganismos, y el nitrógeno es el principal componente de sus estructuras celulares (Capristán *et al.*, 1999; Ndwega y Thompson, 2000).

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en una bodega del área de producción de vermicomposta de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – UL, la cual se localiza en Periférico y Carretera a Santa Fe, Km 1.5, en Torreón, Coahuila México; durante el periodo Mayo-Julio del 2004.

3.1 Materiales y Organismos Utilizados

3.1.1 Biosólidos

Los biosólidos empleados en este experimento provinieron de los lechos de secado de la Planta Tratadora de Aguas Residuales del Club Campestre Torreón, S. A. de C. V., ubicada en el Boulevard Diagonal de las Fuentes No. 711 en la colonia La Merced I, en la ciudad de Torreón Coahuila. Estos lodos se consideran “no peligrosos” en base al análisis CRETIB (NOM-052-SEMARNAT-2003) realizado el 3 de mayo del 2004 por la empresa ALS-Indequim S.A. de C.V., ubicada en Lomas de los Pinos 5505 D de la colonia Antigua Estanzuela en la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Se obtuvieron muestras al azar del lecho de secado con una pala pozera, siendo colocadas en tambos metálicos con capacidad de 200 L para su traslado a las instalaciones de la Universidad.

3.1.2 Estiércol

El estiércol seco de caballo se obtuvo de las unidades pecuarias de la Universidad.

3.1.3 Lombrices

La lombriz *E. fetida* fue empleada para este experimento, debido a que estos organismos presentan un alto índice de reproducción y tienen la capacidad de habitar en lugares con altos contenidos de materia orgánica (Butt, 1999); además,

varios investigadores han sugerido que *E. fetida* puede ser utilizada en el manejo de lodos residuales (Mitchell *et al.*, 1980).

Las lombrices empleadas provinieron del banco de germoplasma de proyecto de "Producción de vermicomposta" que se maneja en la Universidad. Se seleccionaron individuos jóvenes y con el clitelo desarrollado para garantizar que, al presentarse su reproducción, ésta se deba a que la lombriz logró adaptarse a los sustratos del experimento.

3.1.4 Unidad Experimental

Las unidades experimentales se establecieron en vasijas de plástico sin drenaje de 40 cm de diámetro x 10 cm de profundidad, con una capacidad aproximada de 5 Kg (Gajalakshmi *et al.*, 2001). Para evitar la proliferación de insectos en los sustratos, todos los recipientes fueron tapados con tela tul durante los 90 días de duración del experimento.

3.1.5 Sustratos

Se manejaron tres sustratos en diferentes proporciones de biosólidos y estiércol seco de caballo; mientras que T1 fue el tratamiento de control. La composición de los cuatro sustratos evaluados es la siguiente:

Cuadro 3. Composición de los sustratos vermicomposteados con lombriz *E. fetida*.

Tratamiento	Inoculación de Lombrices <i>E. fetida</i>	Relación (volumen : volumen)	
		Lodos residuales	Estiércol seco de caballo
T1	No inoculado	1	0
T2	25 individuos	1	0
T3	25 individuos	1	1
T4	25 individuos	1	2



3.2 Métodos

3.2.1 Manejo De Tratamientos

Los tratamientos fueron regados con agua de la llave cada tercer día, para mantener el porcentaje de humedad adecuado para la supervivencia de la lombriz (entre el 70 y 88 %), ya que las lombrices no soportan mezclas que pasen del 93 % de humedad (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Cada tercer día se realizó el volteo de los sustratos en cada recipiente con ayuda de trinchas de jardinería. El mezclado fue necesario para homogenizar los sustratos, facilitando la presencia de aire necesario para el proceso de descomposición de los lodos residuales y evitar también los posibles malos olores. Además, Huhta y Haimi (1988) mencionan que la distribución de las lombrices en el sustrato no siempre es uniforme y se amontonan en sitios específicos, sobre todo en los sustratos con estiércol.

3.2.2 Muestreo

Durante el desarrollo del experimento se realizaron cuatro muestreos: el primero al inicio del experimento para determinar las características iniciales de cada sustrato y posteriormente a los 30, 60 y 90 días. En cada muestreo se extrajeron alrededor de 200 g de material por cada repetición, se colocaron en bolsas de plástico con la identificación respectiva del tratamiento y se procedió a trasladarlos al laboratorio de suelos de la misma Institución para su análisis.

3.2.3 Metodología del Análisis Químico

Antes de proceder al análisis químico, las muestras secas fueron trituradas con un molino Quaker City Mill Philadelphia modelo 4E, para luego ser tamizados con una malla Alsa de 0.5 mm. Las técnicas empleadas para el análisis de las muestras son las siguientes (Allison, 1982):

-pH y Conductividad Eléctrica:

Para estas dos determinaciones se pesaron 200 g de cada muestra en una balanza analítica Sartorius, tipo 1507. Las muestras se colocaron en un recipiente de plástico de 500 mL, se agregó poco a poco agua destilada y se agitaron las

muestras con una espátula metálica hasta que la pasta formada brilló con la luz y sin acumulación de agua en la superficie. Ya saturadas las muestras se dejaron reposar por 24 horas. Transcurrido este tiempo, las pastas se colocaron en un embudo de porcelana con papel filtro Whatman No. 5 y se filtró al vacío con una bomba Roblenz modelo dgp144, recuperando el extracto en un tubo de ensaye.

A partir del extracto resultante se determinaron tanto pH como CE, utilizando un potenciómetro marca Orion, modelo 420 A. Para la medición del pH, el potenciómetro se calibró con solución buffer de pH 4.0, 7.0 y 10.0. 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 potenciómetro a la medición de CE en mS cm^{-1} para realizar las lecturas correspondientes.

- Capacidad de Intercambio Catiónico:

Para esta determinación fue necesario preparar previamente las siguientes soluciones:

- BaCl_2 1N: se disolvieron 122.12 g de BaCl_2 en agua destilada y se aforó a 1 L.
- Metanol al 70 %: se aforaron 70 mL de CH_3OH a 100 mL con agua destilada.
- Solución saturada de yeso al 5 % en agua: se disolvieron 5 g de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada y se aforó a 1 L. Para ello se agitó la solución durante 1 hr con un agitador magnético Corning Strirrer modelo HSJO y se filtró para retirar el exceso de yeso.
- Solución Buffer: se disolvieron 33.75 g de NH_4Cl en agua destilada con 285 mL de NH_4OH . La solución se aforó a 1 L.
- Negro de Ericromo: se disolvieron 0.5 g de Negro de ericromo y 4.5 g de clorhidrato de hidroxilamina en 100 mL de alcohol etílico.
- Dietilditiocarbamato de sodio al 1 %: se disolvió 1 g de dietilditiocarbamato de sodio en 100 mL de agua destilada.
- NaOH 4 N: se disolvieron 16 g de NaOH en 100 mL de agua destilada y se aforó a 1 L.
- Murexida: se disolvieron 5 g de murexida en 100 mL de agua destilada.

- EDTA 0.02 N: se disolvieron 4 g de EDTA en agua destilada y se añadió 0.1 g de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$. La solución resultante se agitó y se aforó a 1 L.

Una vez cribada la muestra con un tamiz Alsa de malla 0.2 mm, se pesaron 4 g y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, para disolverlos en 15 mL de $BaCl_2$ 1 N. El matraz Erlenmeyer fue tapado con una película de 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 deja reposar por 24 hr.

Al término de ese tiempo, la muestra fue filtrada mediante un embudo de porcelana y con papel filtro Whatman No. 5. La filtración se realizó al vacío con una bomba Roblenz modelo dgp144 y procurando recuperar los residuos de muestra contenidos en el matraz Erlenmeyer, enjuagándolo con $BaCl_2$ 1 N. 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.

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 Parafilm para agitarlo nuevamente por 30 min en el agitador mecánico Eberbach modelo 6010. Se filtró la muestra mediante un embudo de porcelana y con papel filtro Whatman No. 5. La filtración se realizó al vacío con una bomba Roblenz modelo dgp144 y el filtrado se recuperó en un vaso de precipitados de 100 mL.

Para proceder a la titulación de la muestra, se tomaron 5 mL del filtrado (una alícuota) con una pipeta volumétrica de 5 mL, para colocarlos en un matraz Erlenmeyer de 125 mL. Se le agregaron 5 mL de agua destilada, 1 mL de solución Buffer y como indicador una gota de Negro de ericromo. La muestra se tituló con EDTA 0.02 N, virando de color rojo 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, 5 gotas de dietilditiocarbamato de sodio al 1%, 5 gotas de

NaOH y 1 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 meq 100 g⁻¹ es la siguiente:

$$\text{CIC meq } 100^{-1} = \frac{(\text{mL Gasto testigo} - \text{mL Gasto muestra})(\text{Normalidad EDTA})(10000)}{(\text{g Peso muestra})(\text{mL alicuota})}$$

-Materia Orgánica:

Para esta determinación, fue necesario preparar previamente los siguientes reactivos:

K₂Cr₂O₇ 1 N: se disolvieron 49.04 g de K₂Cr₂O₇ en agua destilada y se aforó a 1 L.

FeSO₄ 0.5 N: se disolvieron 140 g de FeSO₄ · 2H₂O en 250 mL de agua destilada. Se adicionaron 15 mL de H₂SO₄ concentrado y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente se aforó a 1 L.

Difenilamina: se disolvieron 0.5 g de difenilamina en 20 mL de agua destilada. Luego se añadieron 100 mL de H₂SO₄ concentrado y se dejó reposar.

Ferroína: se disolvieron 14.85 g de fenetrolina monihidratada y 6.95 g de FeSO₄ en agua destilada. Se aforó a 1 L.

Se pesó 1 g de suelo seco y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Se le adicionaron 10 mL de K₂Cr₂O₇ 1 N a la vez que se agitaba el matraz con cuidado para facilitar la mezcla. Luego se agregaron 20 mL de H₂SO₄ concentrado y se agitó de nuevo durante 1 min, dejándose reposar 30 min. Posteriormente se añadieron 5 mL de H₃PO₄ y como indicador se adicionaron de 5 a 10 gotas de difenilamina o ferroína. La titulación se realizó con la disolución de FeSO₄, virando de color verde a rojo.

Del mismo modo, se corrió un blanco de la muestra en un matraz Erlenmeyer de 500mL . Este blanco fue necesario para calcular la Normalidad exacta del FeSO₄ a partir del gasto que se obtiene al titularlo.

La fórmula para calcular el contenido de Materia Orgánica en porcentaje es la siguiente:

$$\% \text{M.O.} = \frac{[(\text{mL K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)(\text{Normalidad}) - (\text{mL FeSO}_4)(\text{Normalidad})] 0.67}{\text{g Peso muestra}}$$

Para obtener el porcentaje de Carbono Total, se divide el porcentaje resultante de Materia Orgánica entre el factor de transformación de Carbón en Materia Orgánica (1.72).

-Nitrógeno Total:

La determinación de Nitrógeno total se divide en tres partes: digestión, destilación y titulación. Para realizar la digestión, se pesaron en una balanza analítica Sartorius tipo 1507, 5 g de muestra, sobre papel filtro Waltham No. 5, mismo que se colocó en un matraz Kjeldahl. 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 pentahidratado y 2.82 g de sulfato de cobre pentahidratado. Se procedió a la digestión en una estufa Kjendhal marca Labconco, agitando de vez en cuando para evitar que el suelo se pegara al matraz, todo ello hasta que la muestra alcanzó un color verde claro. Se dejó enfriar y se añadieron 300 mL de agua destilada.

Para la destilación, fue necesario preparar una solución de la siguiente manera: en un matraz Erlenmeyer de 500m L se colocaron 10 mL de HCl 0.1N, 50 mL de agua destilada y 4 gotas de rojo de metilo. Esta solución se coloca en el tubo de destilación. Al matraz Kjeldahl con la muestra se le agregaron 100 mL de NaOH al 45 % y se colocó al destilador lo más rápido posible. En la solución del matraz Erlenmeyer de 500 mL se recogieron 200 mL del filtrado de la muestra.

A la par de la muestra, se corrió un testigo. Se tituló con NaOH 0.1 N hasta que desapareció el color rojizo y quedó un color verde claro.

El porcentaje de Nitrógeno total se determina con la fórmula:

$$\% \text{N}_{\text{TOTAL}} = \frac{(\text{mL NaOH Testigo} - \text{mL NaOH muestra})(\text{Normalidad NaOH})(0.014)(100)}{\text{g Peso muestra}}$$

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante regresión lineal, para así definir la tendencia de los cinco parámetros evaluados a través del tiempo.

4.1 Dinámica del pH en los sustratos vermicomposteados

En relación al pH, la Figura 1 permite apreciar que los valores iniciales de los cuatro tratamientos oscilaron entre 7 y 7.5. A partir del día 30, el comportamiento de esta variable fue el siguiente: el pH de los tratamientos T3 y T4, que contienen estiércol, se incrementó hasta alcanzar al día 90 los valores de 8.13 y 7.83 respectivamente; mientras que T1 y T2, que no contienen estiércol, descendieron hasta 6.44 y 6.17 al final del experimento. Se observa también que las diferencias de pH entre los tratamientos se acentúan en el día 60, en el tercer muestreo.

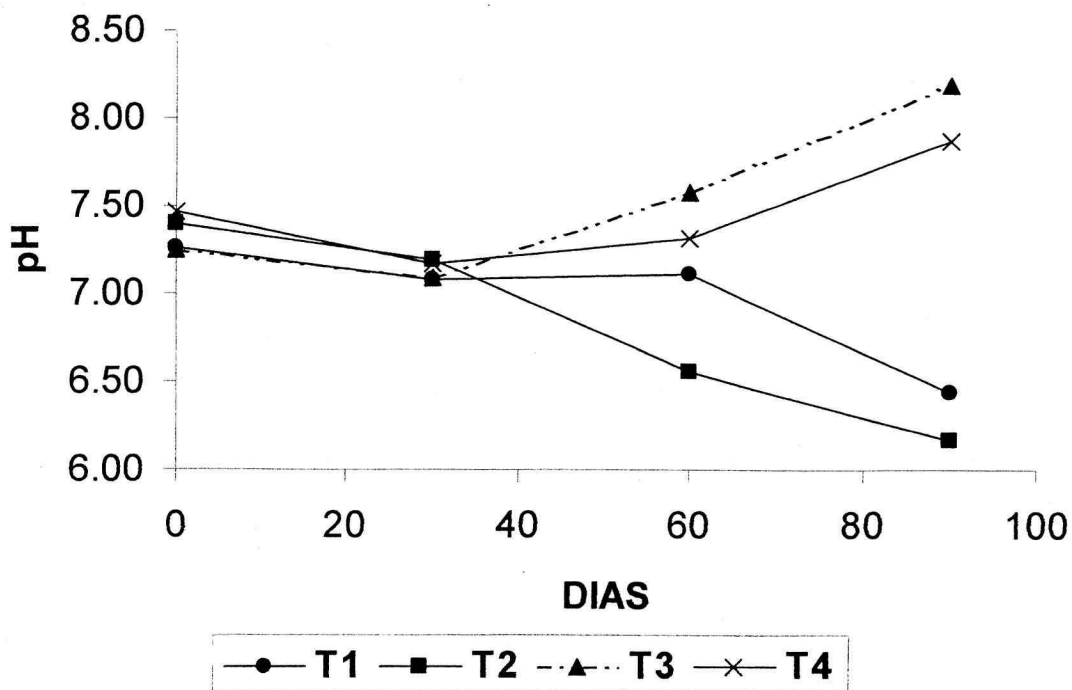


Figura 1. Comportamiento del pH durante el vermicomposteo con *E. fetida*

A diferencia de este experimento, Gunadi y Edwards (2003) reportaron valores de pH entre 4.1 y 8.9 en un trabajo con lombrices *E. fetida* en residuos orgánicos, incluyendo biosólidos. Los valores de pH en el presente trabajo están dentro del rango recomendado para la lombriz, que según Huhta y Haimi (1988) debe oscilar entre 5 y 9. Sin embargo, los tratamientos con mayor aumento de pH (T3 y T4) son los que presentaron mayor población de lombrices (Figura 6), lo que demuestra la tolerancia de *E. fetida* a las variaciones de pH.

El aumento en el pH de los tratamientos T3 y T4 puede asociarse a la participación de la lombriz, pues cuando las secreciones de sus glándulas calcíferas se mezclan con el dióxido de carbono producido por la respiración, se forma carbonato de calcio. Este compuesto básico influye en el pH del sustrato según Rodríguez-Valadares (2004), que obtuvo valores básicos de pH al final de su experimento de vermicomposteo en casi todos los tratamientos con mezclas de biosólidos y residuos urbanos con *E. fetida*.

4.2 Dinámica de la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos vermicomposteados

La CE de los tratamientos T2, T3 y T4 tuvo un comportamiento similar durante los 90 días del experimento a diferencia de T1, como lo muestra la Figura 2. Mientras que en T1 la CE disminuyó lentamente hasta el día 60, en los demás tratamientos la CE se redujo al día 30 en 3.63, 2.62 y 3.32 mS cm⁻¹ respectivamente, lo que puede asociarse a la actividad de la lombriz dado que T1 es el tratamiento de control y no le fueron inoculadas lombrices. En general, los cuatro tratamientos presentaron una disminución en su CE inicial; es decir, se redujo la salinidad de los sustratos.

En esta variable, los valores de CE más bajos se presentaron en los tratamientos con estiércol de caballo y lombrices, como reporta Santamaría-Romero *et al.*, (2001) en un experimento similar, donde se obtuvo vermicomposta y composta a partir de residuos de poda y estiércol de conejo (3:1, v/v) con la lombriz *E. andrei*.

Contreras-Ramos *et al.*, (2005) realizaron un trabajo de vermicomposteo con *E. fetida* en sustratos compuestos de estiércol de vaca y avena, registrando rangos de CE final entre 5 y 9 mS cm⁻¹; coincidiendo con los valores reportados en el presente trabajo.

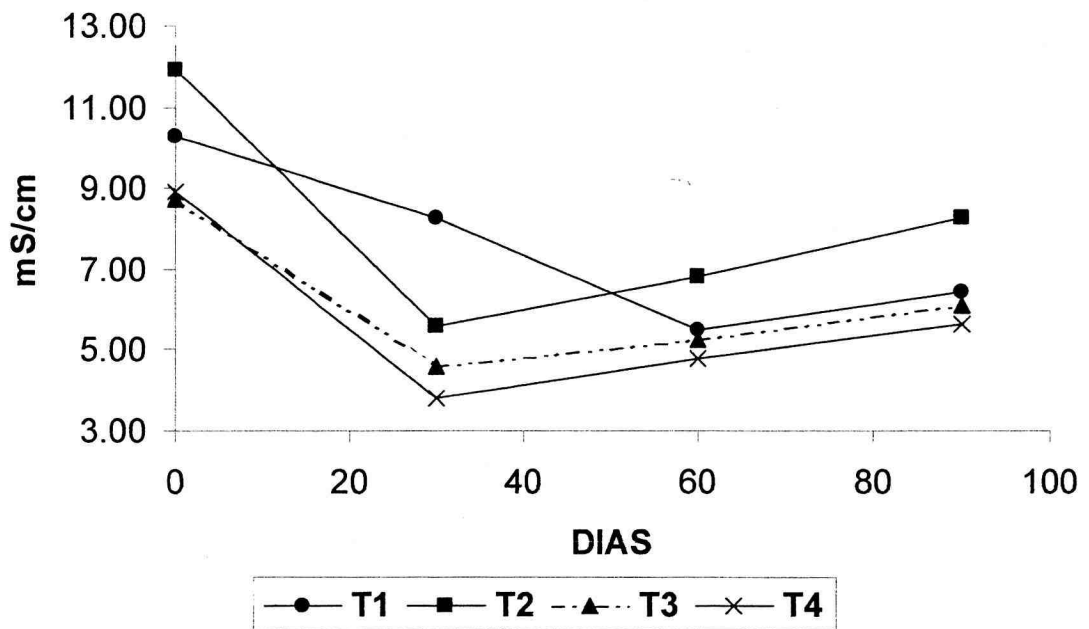


Figura 2. Comportamiento de la CE durante el vermicomposteo con *E. fetida*

4.3 Dinámica de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en los sustratos vermicomposteados

En relación a la CIC, la Figura 3 destaca que los tratamientos sin estiércol con y sin lombrices (T1 y T2) presentaron un incremento significativo de 12.42 y 10.75 meq 100 g⁻¹ de suelo respectivamente, a partir del día 60. En cambio, la CIC en T3 y T4 registró un incremento muy reducido de 0.67 y 2.0 meq 100 g⁻¹ de suelo al final del experimento.

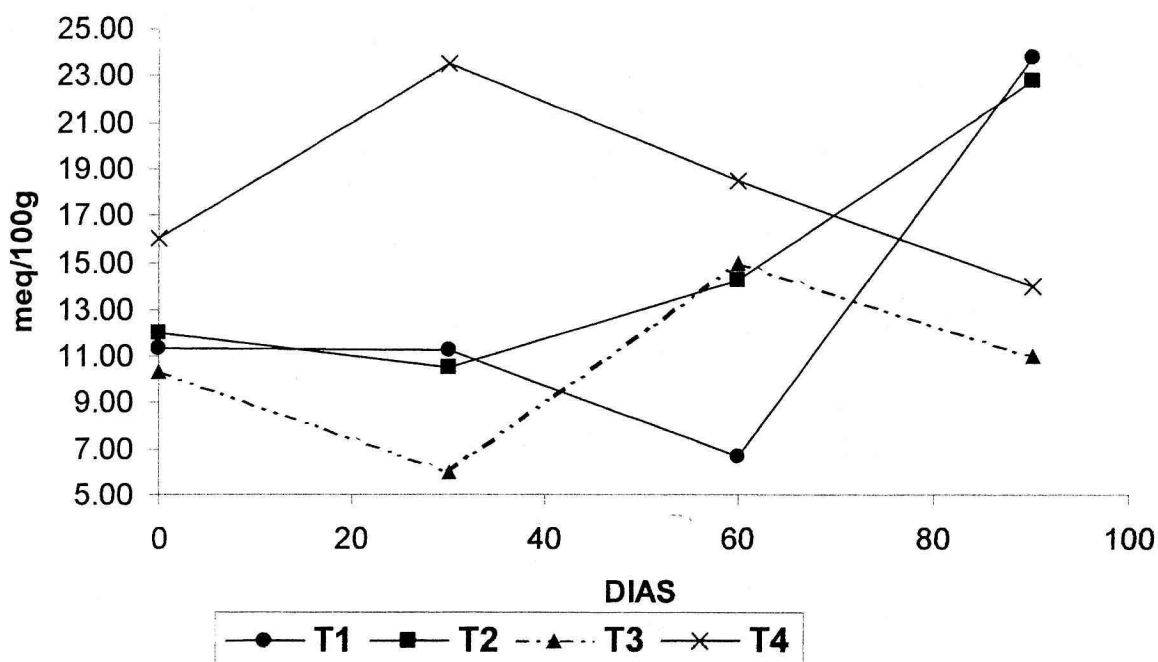


Figura. 3 Comportamiento de la CIC durante el vermicomposteo con *E. fetida*

Al respecto, Contreras-Ramos *et al.*, (2005) reporta la misma tendencia en la CIC al incrementarse de 33 a 42 cmol kg^{-1} , durante un experimento de vermicomposteo de biosólidos con estiércol de bovino y avena en diferentes proporciones, utilizando la lombriz *E. fetida*.

4.4 Dinámica de la Materia Orgánica en los sustratos vermicomposteados

Como muestra la Figura 4, los tratamientos T1, T2 y T3 presentaron un incremento de MO similar en el día 30 y un decremento a partir del día 60. Los valores de MO en el tratamiento T4 se mantuvieron constantes entre 15.35% y 14.94% y a partir del día 60 se redujeron a 13.49%.

Probablemente, el consumo de elementos por parte de la lombriz afectó la concentración de MO, así como las variaciones de pH que se presentaron durante el experimento. Santamaría-Romero *et al.*, (2001) obtuvo la misma tendencia.

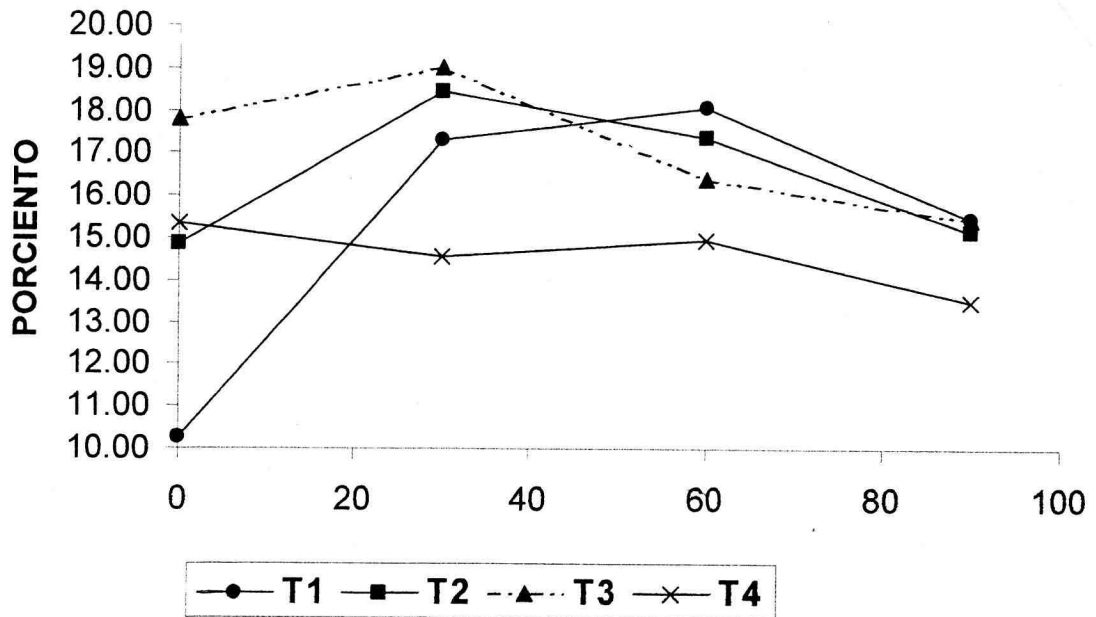


Figura 4. Comportamiento de la MO durante el vermicomposteo con *E. fetida*

En contraparte, Cardoso y Ramírez (2002) reportó un incremento de 60% de MO durante el vermicomposteo de mezclas de biosólidos y residuos de poda de césped a diferentes proporciones de humedad, con la lombriz *E. fetida*.

4.5 Dinámica de la Relación Carbono:Nitrógeno en los sustratos vermicomposteados

En la Figura 5 se observa que los cuatro tratamientos presentaron un incremento en la relación C:N en el día 30, manteniéndose casi sin variaciones hasta el final del experimento. El tratamiento T1 mostró un incremento de 2.65%; mientras que T2 apenas aumentó 0.82% la relación C:N. Los tratamientos T3 y T4 mostraron aumentos de 1.49% y 1.86% respecto a sus valores iniciales. Al día 90, T3 fue el tratamiento más alto con 7.98% y el tratamiento más bajo fue T1 con 6.03% C:N.

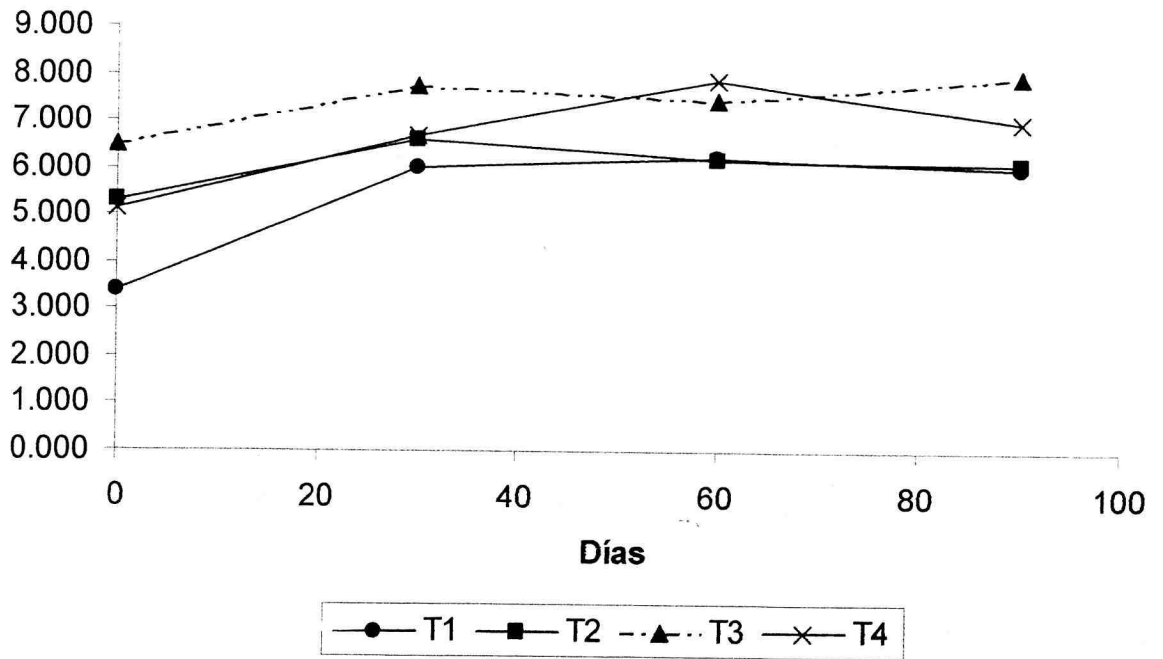


Figura 5. Comportamiento de la relación C:N durante el vermicomposteo con *E. fetida*

Jiménez y García (1992) realizaron un estudio para encontrar los parámetros indicadores del grado de maduración de la composta de biosólidos, en el que se concluyó que una relación C:N menor de 12 es más apropiada para asegurar un buen nivel de descomposición del sustrato, comparado con valores comúnmente aceptados de relación C:N como 25 ó 30, e incluso menores a 20.

Rodriguez-Valadares (2004) obtuvo resultados parecidos a los presentados en el presente experimento en la relación C:N en un experimento de vermicomposteo de biosólidos mezclados en varias proporciones con composta de residuos urbanos, empleando la lombriz *E. fetida*.

Del mismo modo, un experimento de Naddafi (2004) registró incrementos en la relación C:N de todos los tratamientos de biosólidos vermicomposteados con *E. fetida*.

4.6 Conteo Final de *E. fetida* en los Sustratos Vermicomposteados.

A los 90 días del experimento, las poblaciones de *E. fetida* aumentaron considerablemente en los tres tratamientos inoculados. En la Figura 6 se observa que el tratamiento T3 superó a T2 y T4 en el conteo final; con lo que se establece que las lombrices prefieren los sustratos con mezclas de biosólidos y estiércol en proporción 1:1. A diferencia de T3, el tratamiento T2, compuesto sólo de biosólidos, mostró la menor población de individuos; mientras que T4 mostró una población aceptable de lombrices en la mezcla 1:2 de biosólidos y estiércol seco de caballo.

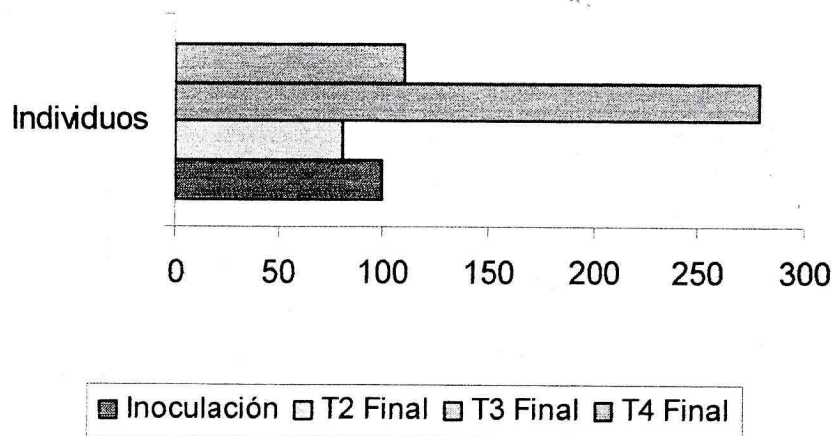


Figura 6. Conteo final de poblaciones de *E. fetida* en los sustratos vermicomposteados

Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos (2004) registraron una supervivencia del 100% de la población de *E. fetida* inoculada en sustratos con 70% biosólidos en diferentes contenidos de humedad.

En otro experimento, Gajalakshmi *et al.*, (2001) inoculó 20 lombrices *E. eugeniae* adultas y saludables en mezclas de residuos orgánicos y estiércol de vaca. Al final de su experimento, la población inicial casi se duplicó o incrementó 2.5 veces en todos los tratamientos.

V.- CONCLUSIONES

El presente experimento permitió comprobar que los biosólidos pueden ser estabilizados mediante la técnica de vermicomposteo, empleando la lombriz epigea *E. fetida*.

El tratamiento de control T1 presentó valores diferentes a los tratamientos T3 y T4, estableciendo cambios una clara diferencia entre las características químicas de los biosólidos no vermicomposteados y los biosólidos vermicomposteados en dos mezclas de estiércol seco de caballo. Lo anterior permite resaltar el papel estabilizador de la lombriz reflejado en valores de pH alrededor de la neutralidad; reducción de la CE; aumento en la CIC; aumento y consumo de MO por parte de la lombriz, así como en la relación C:N. Cabe señalar que la transformación química de los biosólidos vermicomposteados se reflejó en las características físicas del material original, dados los cambios en la estructura, dureza y color; además, los olores inaceptables fueron eliminados.

En el conteo final, la población de lombrices *E. fetida* se redujo 29% en el tratamiento T2; mientras que en T3 aumentó 279% su población inicial y 110% en T4. Lo anterior demuestra una preferencia de la lombriz a las mezclas de biosólidos y estiércol 1:1, y dificultad para adaptarse a tratamientos compuestos sólo por biosólidos como T2. Los sustratos con mezclas de estiércol seco de caballo y biosólidos en relación 1:1 (tratamiento T3) resultaron más eficientes en cuanto a las características químicas evaluadas y además, respecto a la supervivencia y reproducción de *E. fetida*.

Se concluye que el vermicomposteo es una opción ecológica para la estabilización de biosólidos, además de establecer el potencial de la vermicomposta resultante de este residuo en la agricultura orgánica como mejorador de suelos o abono, dadas sus características fisicoquímicas.

VI.- RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales en México se ha incrementado notablemente en los últimos años. De acuerdo con estadísticas de la Comisión Nacional del Agua (CNA), en el año 2003 trabajaron 938 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) a nivel nacional. Durante su proceso, las PTAR generan un subproducto llamado "lodo", que es un sólido de color oscuro y cuyo contenido de humedad es variable. En nuestro país, cuando estos lodos cumplen con la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 se les conoce como "biosólido" o en otros países como "sewage sludge" o "biosolid".

Para facilitar su manejo y evitar posibles problemas con el olor, los agentes patógenos y el contenido de compuestos tóxicos, los lodos residuales deben ser tratados. En este sentido, existen diferentes métodos para su tratamiento como la estabilización alcalina, la digestión aeróbica y anaeróbica o el composteo. Este último proceso comúnmente es utilizado para el tratamiento de residuos orgánicos o para la producción de fertilizantes orgánicos. Recientemente se ha mostrado interés en el desarrollo de procesos basados en la utilización de sistemas biológicos. Un ejemplo de estos sistemas es la crianza de lombrices (vermicultura o lombricultura) para estabilizar diversos residuos orgánicos a través del vermicomposteo. El vermicomposteo consiste en aprovechar la capacidad de adaptación y reproducción de organismos como las lombrices *Eisenia fetida* (Savigny), que se caracterizan por tener un apetito voraz y una alta tasa de crecimiento fuera de su hábitat natural, acelerando la descomposición de residuos orgánicos.

En este trabajo se empleó la técnica de vermicomposteo para el tratamiento de biosólidos generados por una PTAR, y se determinó el comportamiento de las propiedades químicas (pH, Conductividad Eléctrica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Materia Orgánica y Relación Carbono:Nitrógeno) de los sustratos vermicomposteados con lombriz *Eisenia fetida*, en tres tratamientos a diferentes

proporciones de biosólidos (B) y estiércol seco de caballo(E) : T1 (1B:0E) tratamiento de control; T2 (1B:0E); T3 (1B:1E) y T4 (1B:2E). Los tratamientos T2, T3 y T4 fueron inoculados cada uno con 25 lombrices *E. fetida* con el clitelo desarrollado. Los tratamientos fueron regados con agua de la llave y mezclados cada tercer día. Se realizó un muestreo al inicio del experimento y cada 30, 60 y 90 días.

Los resultados fueron analizados mediante regresión lineal. El tratamiento de control T1 presentó valores diferentes a los tratamientos T3 y T4, estableciendo cambios una clara diferencia entre las características químicas de los biosólidos no vermicomposteados y los biosólidos vermicomposteados en dos mezclas de estiércol seco de caballo. Lo anterior permite resaltar el papel estabilizador de la lombriz reflejado en valores de pH alrededor de la neutralidad; reducción de la CE; aumento en la CIC; aumento y consumo de MO por parte de la lombriz, así como en la relación C:N. Cabe señalar que la transformación química de los biosólidos vermicomposteados se reflejó en las características físicas del material original, dados los cambios en la estructura, dureza y color; además, los olores inaceptables fueron eliminados.

En el conteo final, la población de lombrices *E. fetida* se redujo 29% en el tratamiento T2; mientras que en T3 aumentó 279% su población inicial y 110% en T4. Lo anterior demuestra una preferencia de la lombriz a las mezclas de biosólidos y estiércol 1:1, y dificultad para adaptarse a tratamientos compuestos sólo por biosólidos como T2. Los sustratos con mezclas de estiércol seco de caballo y biosólidos en relación 1:1 (tratamiento T3) resultaron más eficientes en cuanto a las características químicas evaluadas y además, respecto a la supervivencia y reproducción de *E. fetida*.

Se concluye que el vermicomposteo es una opción ecológica para la estabilización de biosólidos, además de establecer el potencial de la vermicomposta resultante de este residuo en la agricultura orgánica como mejorador de suelos o abono, dadas sus características fisicoquímicas.

VIII.- LITERATURA CITADA

- Allison, L.,E. 1982. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. 6ª Edición. Limusa. México.
- Aranda, E., I. Barois, P. Arellano, S. Irisson, T. Salazar, J. Rodriguez y J. C. Patron. 1999. "Vermicomposting in the Tropics." International Publishing: 285-287.
- Aslama, T., M. A. Choudharya y S. Saggarb 1999. "Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand." Soil & Tillage Research 51: 103-111.
- Atiyeh, R. M., S. Subler, C. A. Edwards, G. Bachman, J. D. Metzger y W. Shuster 2000. "Effects of Vermicomposts and Composts on Plant Growth in Horticultural Container Media and Soil." *Pediobiología* 44: 579-590.
- Baca, M. T., F. Fornasier y M. De Nobili 1992. "Mineralization and humification pathways two composting processes applied to cotton wastes." *Journal of Fermentation and Bioengineering* 74.
- Bardi, L., A. Mattei, S. Steffan y M. Marzona 2000. "Hydrocarbon degradation by a soil microbial population with beta-cyclodextrin as surfactant to enhance bioavailability." *Enzyme Microb Technol* 27: 709-713.
- Blackemore, R. J. 1995. "The use of earthworms on bioconversion of sewage sludge and municipal waste." Department of Urban Service Waste Management Australia.

- Butt, K. R. 1999. "Effects of thermally dried sewage granules on earthworms and vegetation during pot and field trails." *Bioresource Technology* 67.
- Cameron, E., N. How, S. Saggarr y C. W. Ross 2004. "The Cost-Benefits of Applying Biosolid Composts For Vegetable, Fruit, and Maize/Sweetcorn. Production Systems in New Zealand." *Landcare Research Science Series* 27.
- Capistrán, F., E. Aranda y J. C. Romero 1999. "Manual de Reciclaje, Compostaje y Vermicompostaje." Instituto de Ecología A. C. pp 151. México.
- Cardoso-Vigueros, L. y E. Ramírez-Camperos 2002. "Vermicomposting of sewage sludge: a new technology for Mexico." *Water Science and Technology* 46: 10.
- Chan, P. L. S., Griffiths, D. A. (1988) The vermicomposting of pre-treated pig manure. *Biological Wastes* 24, 57–69.
- Comisión Nacional del Agua. 2003. "Usos del Agua e infraestructura. Estadísticas del Agua en México." Disponible en: <http://www.cna.gob.mx>
Recuperado el 5 de Julio 2005
- Comisión Nacional del Agua. 2004. "Usos del Agua e infraestructura. Estadísticas del Agua en México." Disponible en: <http://www.cna.gob.mx>
Recuperado el 5 de Julio 2005.
- Contreras-Ramos S. M., Escamilla-Silva E. M, Dendooven L 2005. Vermicomposting of biosolids with cow manure and oat straw. *Biol Fertil Soils* 41: 190–198
- Cortez-Cadiz, E. D. C. 2003. *Fundamentos De Ingeniería Para El Tratamiento De Los Biosólidos Generados Por La Depuración De Aguas Servidas De La Region Metropolitana*. Facultad de Ciencias Químicas y Matemáticas. Chile, Universidad de Chile.
- De Bertoldi, M. y U. Schnappinger. 2001. "Correlation among plant design, process control and quality of compost." *Bioprocessing of Solid Waste & Sludge* 1:-9.

- Diario Oficial de la Federación. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 .Protección Ambiental.-Lodos y Biosólidos-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. S. d. M. y. R. Naturales. México126.
- Dirección General de Desarrollo Económico de Torreón, Coahuila. 2004. "Estadísticas del Municipio de Torreón, Coahuila." Presidencia Municipal Torreón, Coahuila. México.
- Domínguez, J., C. A. Edwards y S. Subler 1997. "A comparasion of vermicomposting and composting." *Biocycle* 38: 57-59.
- Eastman, B. R. 1999. "Achieving pathogen stabilized using vermicomposting." *Biocycle*: 62-64.
- Eghball, B., J. F. Power, J. E. Gilley y J. W. Doran 1997. "Nutrient carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure." *Journal Environ* 26.
- Elvira, C., L. Sampedro, E. Benitez y R. Nogales 1998. "Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot scale study." *Bioresource Technolgy* 63: 205-211.
- Environmental Protection Agency. 2000. Environmental regulations and technology: Use and disposal of municipal wastewater sludge. EPA625/10-84-003. U.S. .A.
- Frederickson, J., K. R. Butt, R. M. Morris y C. Daniel 1997. "Combining vermiculture with traditional green waste composting systems." *Soil and Biochemistry* 29: 725-730.
- Gajalakshmi, S. E., V. Ramasamy y S. A. Abbasy 2001. "Potential of two epigeic and two anecic earthwomrs species of vermicomposting of water hyacint." *Bioresource Technology* 76: 177-81.

- García, I. y C. Dorronsoro 1999. "Contaminación del Suelo." Departamento de Edafología y Química Agrícola, Unidad Docente e Investigadora de la Facultad de Ciencias. Universidad de Granada, España.
- Godden, B., M. J. Penninckx y C. Castille 1986. "On the Use of Biological and Chemical Indexes for Determining Agricultural Compost Maturity: Extension to the Field Scale." *Agricultural Wastes* 15:169-178.
- Gunadi, B., C. Blount y C. A. Edwards 2002. "The growth and fecundity of *Eisenia fetida* (Savigny) in cattle solids pre-composted for different periods." *Pedobiología* 46: 15-23.
- Gunadi B., Edwards Clive A. 2003. The effects of multiple applications of different organic wastes on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (Savigny) (Lumbricidae). *Pedobiología* 47
- Hartenstein, R., Bisesi, M. S. (1989) Use of earthworm biotechnology for the management of effluents from intensively housed livestock. *Outlook on Agriculture* 18, 3-7.
- Huhta, V. y J. Haimi 1988. "Reproduction and biomass of *Eisenia fetida* in domestic waste." *Academic Publishing*: 65-69.
- Inbar, Y., Y. Chen y Y. Hadar 1985. "The use of composted slurry produced by methanogenic fermentation of cow manure as growth media." *Acta Horticulturae* 172: 75-82.
- Jiménez Cisneros, B. E. (2002). *La Contaminación Ambiental en México: Causas, Efectos y Tecnologías Apropriadas*. México.
- Jiménez, E. I. y V. P. García 1992. "Determination of Maturity Indices for City Refuse Composts." *Agriculture Ecosystems and Environment* 39: 331-343.

- Jordan, D., F. Li, F. Ponder Jr., E. C. Berry, V. C. Hubbard y K. Y. Kim 1999. "The effects of forest practices on earthworm populations and soil microbial biomass in a hardwood forest in Missouri." *Agr. Ecosyst. Environ.* 13: 31-38.
- Jurado Guerra, P., M. Luna Luna y R. Barretero Hernández 2004. "Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos." *Técnica Pecuaria México* 42: 17.
- Krauss, M., W. Wilcke y W. Zech 2000. "Availability of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Polychlorinated Biphenyls (PCBs) to Earthworms in Urban Soils." *Environ. Sci. Technol.* 34: 4335-4340.
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión.* España, McGraw Hill.
- Labrot, F., J. F. Narbonne, P. Ville, M. Saint Denis y D. Ribera 1999. "Acute Toxicity, Toxicokinetics, and Tissue Target of Lead and Uranium in the Clam *Corbicula fluminea* and the Worm *Eisenia fetida*: Comparison with the Fish *Brachydanio rerio*." *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 36: 167-178.
- Mantovani, J. R., M. C. Pessôa da Cruz, M. E. Ferreira y W. Lopes-Alves 2004. "Extratores para avaliação da disponibilidade de metais pesados em solos adubados com vermicomposto de lixo urbano." *Pesq. Agropec. Bras.* 39: 371-378.
- Metcalf, L. y H. Eddy (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización.* México.
- Mitchell, M. J., S. G. Hornor y B. I. Abrams 1980. "Decomposition of sewage sludge in drying beds and the potential role of the earthworm, *Eisenia foetida*." *Journal Environ* 9: 373-378.

- Morrison, D. E., B. K. Robertson y M. Alexander 2000. "Bioavailability to Earthworms of Aged DDT, DDE, DDD, and Dieldrin in Soil." *Environ. Sci. Technol.* 34: 709-713.
- Naddafi, K., M. Zamanzadeh, A. A. Azimi, G. A. Omrani, A. R. Mesdaghinia y E. Mobedi 2004. "Effect of Temperature, Dry Solids and C/N Ratio on Vermicomposting of Waste Activated Sludge." *Pakistan Journal of Biological Sciences* 7: 1217-1220.
- Ndegwa, P. M. y S. A. Thompson 2001. "Integrating composting and vermicomposting in the treatment of bioconversion of biosolids." *Biores Technol* 76: 107-112.
- Ndegwa, P. M., S. A. Thompson y K. C. Das 2000. "Effects of Stocking Density and Feeding Rate on Vermicomposting of Biosolids." *Bioresource Technology* 71: 5-12.
- Neuhauser, E. F., R. C. Loehr y M. R. Malecki 1988. "The Potential of Earthworms for Managing Sewage Sludge." Academic Publishing: 9-20.
- Nocentini, M., D. Pinelli y F. Fava 2000. "Bioremediation of a soil contaminated by hydrocarbon mixtures: the residual concentration problem". *Chemosphere* 41: 1115-23.
- Peredney, C. L. y P. L. Williams 2000. "Utility of *Caenorhabditis elegans* for Assessing Heavy Metal Contamination in Artificial Soil." *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 39: 113-118.
- Reinecke, S. A., M. W. Prinsloo y A. J. Reinecke 1999. "Resistance of *Eisenia fetida* (Oligochaeta) to Cadmium after Long-Term Exposure." *Ecotox. Environ. Safe.* 45: 75-80.

Rodrigues-Valadares Luciana. 2004. A Vermicompostagem Do Lodo De Lagoas De Tratamento De Efluentes Industriais Consorciada Com Composto De Lixo Urbano. Engenharia Sanitária e Ambiental Vol. 9 - Nº 3. 218-224

Santamaría Romero, Salustio; Ferrera Cerrato, Ronald; Almaraz Suárez, Juan José; Galvis Spinola, Arturo; Barois Boullard, Isabelle. (2001). Dinámica y Relaciones de Microorganismos, C-Orgánico y N-Total Durante el Composteo y vermicomposteo. *Agrociencia* 35: 377-384.

Serrano Espinosa, L. (1997). Las Aguas Residuales y su Tratamiento. Secretaría de Educación Pública. México: 248.

Smernik, R. J., I. W. Oliver y G. Merrington 2003. "Characterization of Sewage Sludge Organic Matter Using Solid-State Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy." *J. Environ Qual* 32.

St-Pierre, M. A., M. R. Laverdière, F. Pagé y L. Côté 1995. "Transformation de fientes de poulet et de résidus de scierie par le lombricompostage." Département des sols et de génie agroalimentaire. Université Laval. Canadá.

Williams, P. H. 1999. "Bugs, glorious bugs." *Nature* 401:14.

Zhang, B.-G., G.-T. Li, T.-S. Shen, J.-K. Wang y Z. Sun. 2000. "Changes in microbial biomass C, N, and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida*." *Soil Biol. Biochem.* 32: 2055-2062.

APÉNDICE A
RESULTADOS POR TRATAMIENTO Y ECUACIONES DE REGRESIÓN

a. Resultados del experimento por tratamientos

	DIAS	N- Total	M.O.	pH	C.E	CIC	C	C:N
		(%)	(%)		(mS cm ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(%)	
T1	0	1.764	10.25	7.26	10.26	11.33	5.959	3.378
	30	1.673	17.33	7.08	8.28	11.25	10.073	6.021
	60	1.689	18.08	7.11	5.47	6.67	10.512	6.223
	90	1.491	15.46	6.44	6.43	23.75	8.989	6.028
T2	0	1.633	14.89	7.40	11.91	12.00	8.656	5.300
	30	1.624	18.48	7.20	5.58	10.50	10.743	6.615
	60	1.624	17.36	6.56	6.80	14.25	10.095	6.216
	90	1.442	15.18	6.17	8.28	22.75	8.828	6.122
T3	0	1.596	17.81	7.25	8.71	10.33	10.354	6.487
	30	1.428	19.05	7.09	4.60	6.00	11.078	7.758
	60	1.279	16.39	7.58	5.25	15.00	9.530	7.453
	90	1.127	15.46	8.19	6.09	11.00	8.989	7.976
T4	0	1.736	15.35	7.47	8.93	16.00	8.922	5.140
	30	1.260	14.56	7.17	3.80	23.50	8.465	6.718
	60	1.099	14.94	7.32	4.80	18.50	8.688	7.906
	90	1.120	13.49	7.88	5.61	14.00	7.843	7.002

b. Conteo Final de Lombrices

Tratamiento	Población Inicial	Población Final
T2	100	81
T3	100	279
T4	100	110

c. Ecuaciones de regresión Lineal del Comportamiento de las variables evaluadas.

pH		
Tratamiento	Ecuación	R ²
T1	$y = -0.125x^2 + 0.355x + 7.025$	0.91
T2	$y = -0.05x^2 - 0.17x + 7.65$	0.98
T3	$y = 0.2x^2 - 0.68x + 7.75$	0.97
T4	$y = 0.225x^2 - 0.995x + 8.275$	0.99

CE		
Tratamiento	Ecuación	R ²
T1	$y = 0.735x^2 - 5.105x + 14.86$	0.92
T2	$y = 1.9525x^2 - 10.73x + 20.323$	0.88
T3	$y = 1.2375x^2 - 6.9085x + 14.153$	0.89
T4	$y = 1.485x^2 - 8.321x + 15.45$	0.86

CIC		
Tratamiento	Ecuación	R ²
T1	$y = 4.29x^2 - 18.182x + 26.53$	0.78
T2	$y = 2.5x^2 - 8.9x + 18.375$	0.99
T3	$y = 0.0825x^2 + 0.6885x + 8.2425$	0.15
T4	$y = -3x^2 + 13.9x + 5.75$	0.83

MO		
Tratamiento	Ecuación	R ²
T1	$y = -0.0027x^2 + 0.297x + 10.397$	0.99
T2	$y = -0.0016x^2 + 0.1435x + 15.07$	0.93
T3	$y = -0.0006x^2 + 0.022x + 18.091$	0.79
T4	$y = -0.0002x^2 - 0.0006x + 15.196$	0.76

C:N		
Tratamiento	Ecuación	R ²
T1	$y = 4E-05x^2 - 0.0047x + 0.2904$	0.95
T2	$y = 1E-05x^2 - 0.0012x + 0.1854$	0.82
T3	$y = 5E-06x^2 - 0.0007x + 0.1517$	0.78
T4	$y = 2E-05x^2 - 0.0021x + 0.1947$	0.99