

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LODOS
RESIDUALES DE MET-MEX PEÑALES CON LOMBRICES (*Eisenia fetida*)**

TESIS

QUE PRESENTA

JORGE LUIS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE, 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

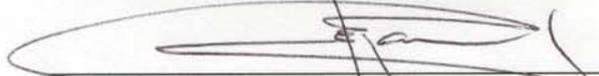
MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LODOS
RESIDUALES DE MET-MEX PEÑALES CON LOMBRICES (*Eisenia fetida*)

POR

JORGE LUIS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

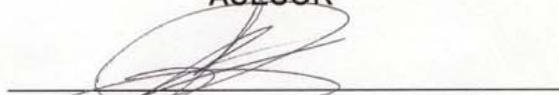
APROBADA POR EL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORÍA

ASESOR PRINCIPAL



DR. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ

ASESOR



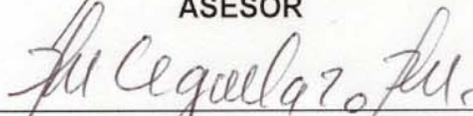
Ph.D. VICENTE DE PAUL REYNA ALVAREZ

ASESOR



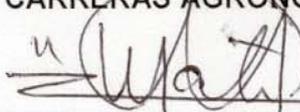
DR. ALFREDO OGAZ

ASESOR

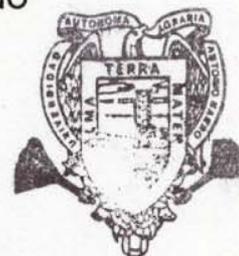


IIQ. ELBA MARGARITA AGUILAR MEDRANO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS



ME. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

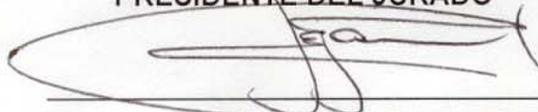
TESIS QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO
EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO

DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

PRESIDENTE DEL JURADO



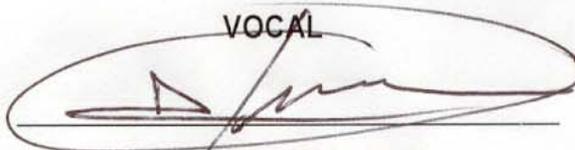
DR. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ

VOCAL



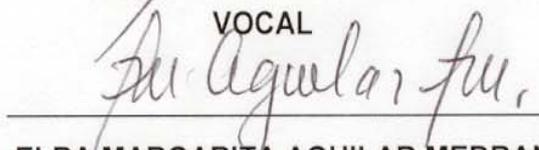
PhD. VICENTE DE PAUL REYNA ALVAREZ

VOCAL



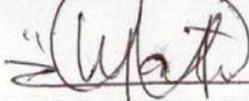
DR. ALFREDO OGAZ

VOCAL

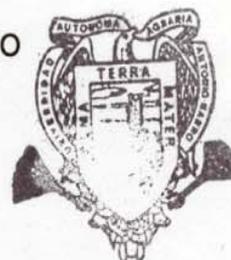


IIQ. ELBA MARGARITA AGUILAR MEDRANO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS



ME. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE, 2009

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por darme la oportunidad de vivir y sobre todo por la dicha de realizar un triunfo más en mi vida.

A Mi Alma Mater:

Por brindarme la oportunidad de obtener una profesión.

Al Dr. Alejandro Moreno Reséndez

Por su tiempo, dedicación, apoyo y experiencias compartidas para la realización de este proyecto.

A Mis Asesores:

IIQ. Elba Margarita Aguilar Medrano
PhD. Vicente De Paul Álvarez Reyna
Dr. Alfredo Ogaz

Gracias por ayudarme a cumplir una meta más, revisando esta investigación y por brindarme sus conocimientos.

A la empresa metalúrgica MET-MEX PEÑALES S.A. de C.V. por la oportunidad de experimentar mi proyecto con desecho residual de la empresa.

DEDICATORIAS

A Mi Madre: Silvia Hernández Antonio

Por darme la oportunidad y el impulso de lograr la meta que me había fijado, por enseñarme a vivir con rectitud y humildad, y sobre todo porque tú eres el mejor ejemplo de esfuerzo, trabajo y superación. Mi respeto y orgullo para ella.

A Mi Hermana: María del Lourdes Hernández Antonio.

Por su apoyo, cariño y comprensión.

A mi Abuelo: Feliciano Hernández Alberto.

Por confiar en mí, por apoyarme en mis decisiones y brindarme la oportunidad de triunfar en la vida.

A Mi Sobrino: Luis Ángel Paz Hernández

Desde ahora que sus vidas empiezan, les deseo que estén llenas de amor y de éxitos que logren alcanzar con su esfuerzo de cada día.

A La QFB. Norma Lydia Rangel Carrillo.

Por la enorme ayuda brindada en los análisis químicos de este experimento, por su buena voluntad, simpatía, y en especial por la dedicación, cariño e incondicional forma que tiene de prestar ayuda a nosotros los alumnos.

A Mis Amigos.

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

A todos ellos, gracias.....

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIAS.....	II
ÍNDICE DE CUADROS.....	VII
ÍNDICE DE DE FIGURAS.....	VIII
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO.....	4
1.2 HIPÓTESIS	4
II.- REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Plantas de Tratamiento de Agua Residual	5
2.2 Generación del lodo residual	7
2.2.1 Composición del lodo residual.....	7
2.3 Alternativas de tratamiento del lodo residual	8
2.3.1 Tratamiento físico.....	10
2.3.2 Tratamiento Químico.....	11
2.3.3 Tratamiento Térmico	11
2.3.4 Tratamiento biológico	12
2.4 Aplicación del lodo residual	14
2.5 Vermicultura	15
2.6 La lombriz de tierra	16
2.6.1 Lombriz Roja Californiana	17
2.6.2 Clasificación taxonómica.....	17
2.6.3 Características externas.....	18
2.6.4 Características internas.....	18
2.6.5 Utilización de la lombriz <i>Eisenia fetida</i>	20
2.7 Vermicomposteo.....	21
2.7.1 Método de cría	22
2.7.2 Materias primas.....	22
2.7.3 Estiércol de Caballo.....	23
2.7.4 Patologías y Enemigos de la lombriz.....	24
2.7.5 Inoculación de lombriz.....	25

2.7.6 Prueba de supervivencia	25
2.7.7 Factores del manejo	26
2.7.8 Etapas	27
2.7.9 El papel de la lombriz	28
2.8 Vermicomposteo de lodo residual.....	30
2.9 El vermicompost	31
2.1 Importancia de las propiedades químicas	33
2.10.1 pH.....	33
2.10.2 Conductividad Eléctrica (CE).....	34
2.10.3 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	34
2.10.4 Materia Orgánica (MO).....	35
2.10.5 Nitrógeno Total (NT).....	35
2.10.6 Relación Carbono: Nitrógeno (C:N).....	36
III.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1 Localización geográfica	38
3.2 Localización del experimento	38
3.3 Condiciones del lugar del experimento.....	38
3.4 Materias primas y organismos utilizados	38
3.4.1 Lodo residual.....	39
3.4.2 Estiércol de caballo	39
3.4.3 Lombriz <i>Eisenia fetida</i>	39
3.4.4 Unidad experimental.....	40
3.4.5 Composición de los sustratos.....	40
3.5 Desarrollo del experimento	41
3.5.1 Ensayos preliminares	41
3.5.2 Riego	42
3.5.3 Aireación	42
3.5.4 Registro de temperatura y pH	42
3.5.5 Muestreo	42
3.6 Variables evaluadas	43
3.6.1 Metodología de los análisis químicos.....	43
IV.- RESULTADOS Y DISCUSION.....	48
4.1 Dinámica del pH en los sustratos vermicomposteados	48

4.2 Dinámica de la Conductividad Eléctrica en los sustratos vermicomposteados	51
4.3 Dinámica de la Capacidad de Intercambio Catiónico en los sustratos vermicomposteados	53
4.4 Dinámica de la Materia Orgánica en los sustratos vermicomposteados	55
4.5 Dinámica del comportamiento de la variable Carbono Total en los sustratos vermicomposteados.....	58
4.6 Dinámica del comportamiento de la variable Nitrógeno Total en los sustratos vermicomposteados.....	60
4.7 Dinámica de la Relación de Carbono:Nitrógeno en los sustratos vermicomposteados	62
4.8 Conteo final de la lombriz <i>Eisenia fetida</i> en los sustratos vermicomposteados	64
V.- CONCLUSIONES.....	65
VI.- RESUMEN	66
VII.- LITERATURA CITADA.....	68
VIII.- ÁPENDICE	79

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos	9
Cuadro 2. Tipo, clase y aprovechamiento de biosólidos.....	10
Cuadro 3. Composición de los sustratos vermicomposteados con la lombriz <i>Eisenia fetida</i>	41
Cuadro 4. Análisis de regresión polinómica del comportamiento del pH en los sustratos evaluados	50
Cuadro 5. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la CE en los sustratos evaluados.....	53
Cuadro 6. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la CIC en los sustratos evaluados.....	55
Cuadro 7. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la MO en los sustratos evaluados.....	57
Cuadro 8. Análisis de regresión polinómica del comportamiento del CT en los sustratos evaluados	59
Cuadro 9. Análisis de regresión polinómica del comportamiento del NT en los sustratos evaluados	61
Cuadro 10. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la relación C:N	63

ÍNDICE DE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento del pH durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	50
Figura 2. Comportamiento de la CE durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	52
Figura 3. Comportamiento de la CIC durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	54
Figura 4. Comportamiento de la MO durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	56
Figura 5. Comportamiento del % de Carbono Orgánico durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	59
Figura 6. Comportamiento del % de Nitrógeno Total durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	61
Figura 7. Comportamiento de la Relación C:N durante el vermicomposteo con <i>E. fetida</i>	63
Figura 8. Conteo final de <i>Eisenia fetida</i> en los sustratos vermicomposteados	64

I.- INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, desarrollo de la urbanización y diversificación de los procesos industriales han provocado problemas ambientales que se reflejan en la contaminación del aire, suelo y agua, así como serios problemas en la salud humana (Puerta-Echeverri, 2004). Debido a esto, las nuevas generaciones de ambientalistas, las preocupaciones sociales, y una creciente conciencia ambiental a través del mundo han activado la búsqueda de nuevos productos y procesos que sean compatibles con el ambiente. La sustentabilidad, ecología industrial, ecoeficiencia, y química verde son los nuevos principios que guían el desarrollo de las nuevas generaciones de productos y procesos (Nayaran, 2001).

El tratamiento de agua residual en México se ha incrementado notablemente en los últimos años. Sin embargo, en este país sólo un bajo porcentaje de agua residual urbana e industrial es tratada adecuadamente. La mayor parte del agua residual es utilizada para riego agrícola sin tratamiento previo, lo que representa un serio peligro debido a que contienen elevadas concentraciones de compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, metales pesados y organismos patógenos, que pueden afectar la salud humana mediante la exposición directa o a través de los alimentos derivados de las cosechas y el ganado (Rivas-Lucero *et al.*, 2003).

Durante su actividad, las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) generan un subproducto llamado "lodo", que está compuesto por materia orgánica residual no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables y potencialmente tóxicos y sales inocuas y/ o potencialmente tóxicas que han sido removidos durante los tratamientos aplicados a las aguas residuales. Los materiales, productos y sustancias mencionados pueden estar presentes en formas originales o haber sufrido

transformaciones durante el proceso de tratamiento que se aplique en cada PTAR (Suthar, 2009). En México cuando estos lodos cumplen con la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2003 (Protección Ambiental.- Lodos y biosólidos- Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final) (DOF 2003), se les conoce como “biosólidos” y en otros países como “*sewage sludge*” o “*biosolid*” (Jurado-Guerra *et al.*, 2004).

La mayor parte de los sistemas de tratamiento de agua residual municipal e industrial instalados en Latinoamérica no incluyen el manejo y disposición final del lodo residual generados. En estas regiones, el manejo de lodos, es problemático debido a lo costoso que resulta la instalación de reactores para la estabilización de estos materiales residuales, los sistemas de deshidratación y el traslado del lodo a los sitios de disposición final (Esteller, 2002). Por lo anterior, muchas de estas plantas sólo cuentan con lechos de secado donde se deshidrata el lodo y después es conducido a basureros a cielo abierto, vertidos al drenaje o a corrientes superficiales, rellenos sanitarios e incineración que son los métodos de disposición final utilizados actualmente (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Considerando lo anterior, para facilitar su manejo y evitar posibles problemas con los olores fétidos, los agentes patógenos y el contenido de compuesto tóxicos, los lodos residuales deben ser tratados. Las tecnologías más utilizadas hasta el momento para evitar esta problemática comienzan a ser reemplazadas por nuevos procedimientos tales como la digestión alcalina, el composteo y la aplicación del lodo de manera directa al suelo, previa estabilización con cal o digestión aerobia o anaerobia. Estos procedimientos permiten emplear los lodos en agricultura con el fin de aprovechar sus características, ya que éstos pueden utilizarse como acondicionadores de suelo, fertilizantes, para recuperación de suelos erosionados, parques, áreas forestales y jardines, así como en viveros (Esteller, 2002).

Recientemente se ha demostrado interés en el desarrollo de procesos basados en la utilización de sistemas biológicos para el tratamiento de los lodos residuales (Chhotu y Madhusudan, 2008). Un ejemplo de estos sistemas es la crianza de lombrices (vermicultura o lombricultura) para estabilizar diversos residuos orgánicos a través del vermicomposteo (Ndewga *et al.*, 2000). El vermicomposteo consiste en aprovechar la capacidad de reproducción de organismos como las lombrices *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* o *Eudrilus eugeniae*, que se caracterizan por tener un apetito voraz y alta tasa de crecimiento fuera de su hábitat natural, acelerando la descomposición de diversos residuos orgánicos (Atiyeh *et al.*, 2000; Gajalakshmi *et al.*, 2004).

La investigación sobre el potencial del vermicomposteo de los lodos residuales data de 1970. En ese entonces se demostró, a escala de laboratorio, que estos lodos podían emplearse como sustrato de la lombriz *Eisenia fetida*, además de que en el proceso, el lodo se estabiliza aproximadamente tres veces más rápido que el lodo no vermicomposteadado y que los olores fétidos desaparecen rápidamente (Naddafi *et al.*, 2004).

Actualmente, el empleo de las lombrices para el manejo de los biosólidos se lleva a cabo en Estados Unidos, Europa, Nueva Zelanda y Australia (Cameron *et al.*, 2004). Sin embargo, aunque el vermicomposteo es una tecnología innovadora en el tratamiento de los lodos residuales en México, aun falta profundizar en la generación de conocimientos sobre el manejo de éstos a través de este proceso, aunque ya existen experiencias en el tratamiento de basura orgánica y residuos de café con estos organismos (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Por lo anteriormente señalado, en este experimento se estableció el siguiente objetivo:

1.1 OBJETIVO

- Determinar el efecto de la lombriz *Eisenia fetida* sobre la dinámica de las propiedades químicas de los lodos residuales provenientes de la Planta Tratadora de Agua Residual de la empresa metalúrgica MET-MEX PEÑOLES S.A. de C.V.

1.2 HIPÓTESIS

El lodo residual de una Planta Tratadora de Agua Residual pueden ser modificados en sus propiedades químicas por la acción de las lombrices *Eisenia fetida*.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Plantas de Tratamiento de Agua Residual

En México, se tienen problemas de disponibilidad de agua por su distribución fisiográfica y climática, por la contaminación de agua superficial y subterránea y por el incremento acelerado de las demandas que requieren los diferentes usos (Escalante *et al.*, 2002). En este país se estima que cada persona consume un promedio de 570 L de agua al día. El agua fresca que llega a cada habitación por la tubería, sale de la casa por otra tubería distinta; el agua fresca se convierte en agua residual. El agua residual proviene de hogares, escuelas, negocios, industrias y de la escorrentía producida por la lluvia. En las ciudades, el agua residual que logra recuperarse en los sistema de drenaje urbano, se va por las cloacas hasta las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (Torres *et al.*, 2007).

El agua residual se compone básicamente, de agua 99.9% y el 0.1% de materia sólida disuelta o suspendida. Este 0.1% referido es el que se requiere ser removido para que el agua pueda ser reutilizada (Corrêa *et al.*, 2007). El tratamiento de agua residual, es un proceso que a su vez incorpora procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua efluente que ha sido utilizada por el hombre (Castillo *et al.*, 2005).

El tratamiento convencional para el manejo de agua residual municipal comprende tratamiento preeliminar, 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 (Cortez-Cadiz, 2003):

- En el tratamiento preeliminar, el agua cruda es cribada para remover 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 de los depósitos y retirado del proceso, pues constituye 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, carbono y energía presente en el afluente 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 efluente 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 efluente; mientras que los procesos de membrana, como la osmosis inversa o la nanofiltración, se emplea en la eliminación de compuestos orgánicos, pesticidas y elementos traza. La desinfección se realiza comúnmente mediante la aplicación de cloro o radiación ultravioleta (UV).

El reúso del agua residual tratada es actualmente un recurso valioso y su demanda aumentará en la medida en que decrezca la disponibilidad y se incremente la necesidad de agua de primer uso (Escalante *et al.*, 2004). Sin embargo, en México la operación de las plantas tratadoras de aguas residuales es muy reciente, por lo que la experiencia en el uso y manejo de los lodos (biosólidos) generados en éstas, es mínima (Uribe-Montes *et al.*, 2003).

Las técnicas que han sido utilizadas para el tratamiento y la disposición final de residuos sólidos en otros países y que pueden aplicarse al manejo de lodos residuales en México son las siguientes: tratamientos anaerobio y aerobio, disposición en suelos, tratamientos térmicos (pirólisis y incineración) y confinamiento controlado (Millares *et al.*, 2002).

2.2 Generación del lodo residual

El manejo o tratamiento del agua residual implica la separación de las sustancias contaminantes contenidas en ésta, obteniéndose un efluente líquido y una fracción de sólidos, llamados lodos (Quinchía y Carmona, 2004).

El sistema de tratamiento aerobio es el más usado para el tratamiento de agua residual, debido a que resiste amplias variaciones en la composición del efluente; sin embargo, el principal problema que se presenta en este sistema aerobio es la cantidad de lodo residual que se genera. En este tipo de tratamiento intervienen no solo microorganismos quimioheterótrofos (como bacterias y hongos), sino también depredadores (como los protozoos) que utilizan la masa microbiana como fuente de elementos nutritivos (Cortez-Cadiz, 2003).

El manejo y disposición de lodos de desecho provenientes de una planta de tratamiento de agua residual sin una metodología adecuada, puede generar efectos negativos tanto al ambiente como a la salud pública (Millares *et al.*, 2002). El tratamiento de los lodos y su disposición corresponden a las operaciones más costosas de una Planta de Tratamiento de Agua Residual (Castillo *et al.*, 2002).

2.2.1 Composición del lodo residual

El lodo residual, además de contener componentes valiosos, como materia orgánica y elementos (macro y micro), contiene componentes problemáticos, como metales pesados, contaminantes orgánicos y organismos patógenos. Esta composición no sorprende dado el origen del

agua negra, sin embargo, hoy en día debido al desarrollo del conocimiento científico se puede potenciar el valor de los componentes útiles y disminuir la peligrosidad de los otros (Utria *et al.*, 2006).

El lodo residual aporta microelementos como Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Magnesio (Mg) a suelos calcáreos deficientes, además incluye niveles elevados de metales pesados entre los que se encuentran Cadmio (Cd) y plomo (Pb) (Uribe-Montes *et al.*, 2003). Éstos también pueden ser fuentes de lenta liberación de nitrógeno (N) y fósforo (P), a diferencia de los fertilizantes minerales, y por consiguiente podrían ser utilizados para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y consecuentemente su fertilidad (Gil *et al.*, 2001).

Tomando en cuenta lo anterior, se genera una doble problemática: por una parte el vertido de los lodos en sitios inadecuados puede generar severos problemas de contaminación, y por otro lado se están desperdiciando las propiedades benéficas de estos lodos que pudieran ser aprovechadas en la agricultura o en el mejoramiento del suelo (Castrejón *et al.*, 2000).

2.3 Alternativas de tratamiento del lodo residual

La creciente conciencia acerca de la conservación del ambiente así como los riesgos de la salud asociados con los agroquímicos y las preferencias de los consumidores por los alimentos inocuos y libres de riesgo son los principales factores del creciente interés de formas alternativas de agricultura en el mundo (Aalok *et al.*, 2008). La agricultura orgánica es una entre el amplio espectro de métodos de producción que dan apoyo al ambiente. La demanda de alimentos orgánicos está incrementándose constantemente, tanto en países desarrollados, como en los países en vías de desarrollo, con un índice promedio de crecimiento anual del 20 al 25% (Amir *et al.*, 2003).

De acuerdo con la Norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental, Estándares para la aplicación y Disposición de Lodo de Agua Residuales 40 CFR (“Standards for the Use and Disposal of Swage 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, corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso (CRETIB) de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2003 (características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y límites que hacen a un residuos peligrosos por su toxicidad al ambiente). En otras palabras, los lodos residuales son tratados adicionalmente por que se pretende incorporarlos al suelo como abono orgánico o bien para disponerlos sin comprometer la salud pública y el ambiente (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002).

Al respecto la NOM-004-SEMARNAT-2002 (cuadro 1) establece las siguientes clasificaciones para el aprovechamiento de los biosólidos. Además en el cuadro 2 se presenta la clasificación de los biosólidos en función de su aprovechamiento.

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

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

*Numero más probable; **Huevos de Helmintos viables

Cuadro 2. Tipo, clase y aprovechamiento de biosólidos

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

Las diferentes alternativas para el tratamiento del lodo residual 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 (Cortez-Cadiz, 2003).

2.3.1 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).

- Desecado

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).

2.3.2 Tratamiento Químico

- Acondicionamiento químico

En este tratamiento se reduce la humedad del lodo desde un 90-99% a un 65-85% dependiendo de la naturalidad 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 se encuentra el cloruro férrico, la cal, el aluminio y los polímeros orgánicos. Su dosificación debe ser en forma líquida, con lo cual algunos reactivos requieren ser previamente disueltos antes de ser incorporados (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 (Mahamud *et al* 1996; Cortez-Cadiz, 2003).

2.3.3 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).

- Incineración

La incineración es el proceso térmico en el cual 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 (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 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* 1996).

2.3.4 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 los cuales destacan los siguientes (Cortez-Cadiz, 2003):

- 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 la materia orgánica 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).

- 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 (Mahamud *et al.*, 1996).

- Vermicomposteo.

Se trata de un proceso de descomposición aerobio de bioxidación y estabilización de los sustratos orgánicos a través de la acción descomponedora conjunta de lombrices y microorganismos, que lo convierten en un material humificado y mineralizado (Durán y Henríquez, 2007).

2.4 Aplicación del lodo residual

El lodo de las plantas depuradoras de agua residual representa un serio problema en las grandes poblaciones debido al volumen diario que se genera y al posible riesgo de contaminación y deterioro del ambiente, pero también son una fuente de materia orgánica que puede ser objeto de empleo agrícola (Delgado-Arroyo *et al.*, 2004), ya que contiene elementos nutritivos considerados esenciales para el desarrollo de las plantas destacándose su contenido en nitrógeno, fósforo y microelementos nutritivos (Miralles *et al.*, 2002). La riqueza en nitrógeno, fósforo, con respecto a los compuestos orgánicos tradicionales en agricultura, es 3 a 4 veces superior. El contenido en materia orgánica del compost de lodos oscila entre 35 % y 40 % (Paniagua-Michel y Rodríguez-Quiroz, 2005). La aplicación de lodos a los suelos agrícolas constituye la alternativa mas conveniente para su disposición, ya que se aprovechan los recursos fertilizantes presentes en los mismos (Miralles *et al.*, 2002).

La aplicación del lodo residual a los suelos agrícolas es una práctica habitual en países desarrollados por razones prácticas y económicas. El lodo residual tiene un valor como fertilizante y mejora también las propiedades físicas del suelo. La productividad del suelo aumenta frecuentemente, a causa del llamado efecto de la materia orgánica que se produce después de la aplicación del lodo residual (Quintero-Lizaola *et al.*, 2000).

El suelo puede ser un buen receptor de residuos orgánicos pero el uso indiscriminado del lodo residual en los suelos agrícolas puede provocar la alteración de sus características, la contaminación del agua subterránea, de ciertos cultivos o de la cadena trófica. Sin embargo, la aplicación del lodo en la agricultura no debe hacerse sin contar con un conocimiento de su naturaleza y con una normativa básica para su adecuada aplicación, pues el lodo presenta, algunos aspectos negativos en cuanto a su uso como abono, como son la presencia de sustancias tóxicas (metales pesados, compuestos orgánicos no biodegradables, alta concentración de sales, etc.) y de microorganismos patógenos que pueden influir negativamente tanto en los suelos como en los cultivos (Miralles *et al.*,2002.)

Adecuadamente se puede aprovechar el lodo como mejorador de suelo, ya que, además de proporcionar elementos nutritivos, facilitan el transporte de los mismos, incrementan la retención de agua y mejoran el suelo cultivable. Por lo tanto, al uso agrícola hay que sumarle la posibilidad de que se les pueda utilizar para regenerar suelos degradados o bien tratar suelos de bosques, lo que permitiría mejorar la cubierta vegetal (Molina *et al.*, 2001).

La falta de un mayor conocimiento sobre el uso del lodo residual como material fertilizante, debido a su alto contenido de materia orgánica, elementos nutritivos, organismos patógenos y metales pesados, obliga a establecer trabajos experimentales, que permitan contar con una explicación más precisa sobre el impacto de este material sobre las propiedades del suelo, el ambiente y cadenas tróficas (Miralles *et al.*,2002.).

2.5 Vermicultura

Literalmente la palabra lombricultura o vermicultura proviene del latín "*vermes*" que significa gusano, lombriz y cultura, conocimiento. Se deduce que no es más que: estudio o conocimiento de los *vermes*. Sin embargo, en la actualidad este concepto es más amplio y comprende, la utilización de la lombriz como agente biológico en el proceso de transformación y reciclaje

de residuos orgánicos de todo tipo, tales como restos de cosecha, estiércol, residuos orgánicos industriales, basuras domésticas, lodos de estaciones depuradoras, entre otros materiales, con el objetivo de producir humus de lombriz y al mismo tiempo reciclar residuos orgánicos, muchos de las cuales pueden ser fuentes de contaminación ambiental y afectar la salud del ser humano (Ducasals, 2002; Aalok *et al.*, 2008).

2.6 La lombriz de tierra

Dentro de la macrofauna del suelo, el grupo más importante es el de la lombriz del suelo, con amplia distribución en el mundo (Delgado- Arroyo, 2004). Es un organismo biológicamente simple, siendo el agua su principal constituyente (80 a 90 %) de su peso total. Tiene diferentes colores variando de pálidos, rosados, negros, marrones y rojos intensos con franjas amarillentas entre los segmentos, su forma es cilíndrica con secciones cuadrangulares, el tamaño varía de acuerdo a las especies de 5 a 30 cm de largo y su diámetro oscila entre 5 a 25 mm, el número de segmentos que posee es de acuerdo a la especie, variando éstos de 80 a 175 anillos (Rodríguez-Valadares, 2004).

Con respecto a la reutilización de residuos, se destaca que, desde tiempos inmemorables, la lombriz de tierra se ha considerado como un animal ecológico por definición. Las lombrices de tierra utilizan residuos, de origen animal, vegetal, industrial y humano, como fuente de energía para su metabolismo y generan deyecciones, mismas que por sus características fisicoquímicas y biológicas se convierten en un abono orgánico y ecológico de alta calidad, denominado vermicompost (Moreno-Reséndez y Cano-Ríos, 2004).

Debido a lo anterior, y de acuerdo con Moreno-Reséndez y Cano-Ríos, (2004), se puede señalar que se ha desarrollado un resurgimiento en el interés sobre las lombrices, conducido por las preocupaciones ambientales y económicas, particularmente debido a la necesidad de conocer y utilizar sus

funciones dentro de la agricultura sustentable, y para explotar su potencial en el proceso de reciclaje de residuos orgánicos.

Utilizar las lombrices como reductor de los biosólidos es una alternativa viable sobre todo para la producción de sustratos con alta calidad de elementos nutritivos y bacterias que pueden ser utilizados en áreas como la agricultura y la recuperación de suelo, creación de áreas verdes y boscosas (Rodríguez-Valadares, 2004). Existen multitud de tipos de lombrices, pero dentro de las más utilizadas para el vermicomposteo, se encuentra la conocida como lombriz roja de California (*Eisenia fetida*) (Auxilia *et al.*, 2003).

2.6.1 Lombriz Roja Californiana

Se le conoce como lombriz Roja Californiana porque en ese Estado de los E. E. U. U., se descubrieron sus propiedades para el ecosistema y donde se instalaron los primeros criaderos a partir de los años 50 (Reinés-Alvarez *et al.*, 2005).

2.6.2 Clasificación taxonómica

La lombriz *Eisenia fetida* está clasificada dentro del reino animal de la siguiente manera (Clavería-Cacheo, 2005):

Reino:	Animal
Phylum:	Anélidos
Clase:	Clitelados
Orden:	Oligoquetos
Familia:	Lombrices
Género:	<i>Eisenia</i>
Especie:	<i>fetida</i>
Nombre común:	Lombriz Roja de California, Coqueta Roja.

La lombriz *Eisenia fetida* es la especie más conocida y empleada en más del 80% de los criaderos del mundo (Clavería-Cacheo, 2005).

2.6.3 Características externas.

La lombriz *E. fetida* posee el cuerpo alargado, segmentado y con simetría bilateral. Existe una porción más gruesa en el tercio anterior de 5 mm de longitud, llamada clitelo, cuya función está relacionada con la reproducción sexual. Al nacer las lombrices son blancas, transcurridos 5 ó 6 días adquieren tonalidades de color rosa y a los 90 ó 120 días son ya catalogadas como adultas, siendo de color rojizo y estando en condiciones de aparearse (Clavería-Cacheo, 2005).

La lombriz Roja Californiana mide de 6 a 8 cm de longitud, su diámetro oscila entre 3 y 5 mm, pesa en edad adulta aproximadamente 1 g, es de color rojo oscuro y no tiene dientes. Es fotofóbica (le teme a la luz solar); unas células especiales situadas a lo largo de su cuerpo le avisan de la presencia de la luz, que es su terrible enemiga. Los rayos ultravioleta la matan en pocos segundos y no contrae ni transmite enfermedades (Clavería-Cacheo, 2005).

2.6.4 Características internas

Según diversos autores Clavería-Cacheo (2005), Pineda (2006) y González (2006) las características internas de la Lombriz Roja Californiana (*Eisenia fetida*) son:

- **Cutícula:** Es una lámina muy delgada de color marrón brillante, quitinosa, fina y transparente, que recubre a toda la lombriz como una barrera protectora del medio que la rodea.
- **Epidermis:** Situada debajo de la cutícula, es un epitelio simple con células glandulares que producen una secreción mucosa, responsable de la formación de la cutícula y del mantenimiento de la humedad y la flexibilidad de la misma.
- **Capas musculares:** Son dos, una circular interna y otra longitudinal externa. Es un sistema muy desarrollado que permite a este ejemplar efectuar cualquier tipo de movimiento. Su cuerpo está dotado de una serie de anillos que son capaces de adherirse en el suelo, estirarse y encogerse para realizar los desplazamientos.

- Peritoneo: Es la capa más interna y limita exteriormente con el celoma de la lombriz.
- Celoma: Es una cavidad que contiene líquido celómico y se extiende a lo largo del animal, dividida por los septos (segmentos), actuando como esqueleto hidrostático.
- Aparato Circulatorio: Formado por vasos sanguíneos. Estas lombrices tienen dos vasos sanguíneos, uno dorsal y otro ventral, posee también otros vasos capilares que llevan la sangre a todo el cuerpo. La sangre circula por un sistema cerrado constituido por cinco pares de corazones.
- Aparato Respiratorio: Es primitivo, el intercambio de oxígeno se produce a través de la pared del cuerpo por difusión.
- Sistema Digestivo: En la parte superior de la apertura bucal se sitúa el prostomio con forma de labio. Las células del paladar son las encargadas de seleccionar el alimento que posteriormente pasa al esófago donde se localizan las glándulas calcíferas. Estas glándulas segregan iones de calcio, contribuyendo a la regulación del equilibrio ácido básico, tendiendo a neutralizar los valores de pH. Posteriormente se encuentra el buche, en el cual el alimento queda retenido para dirigirse al intestino.
- Aparato Excretor: Formado por nefridios, dos para cada anillo. Las células internas son ciliadas y sus movimientos permiten retirar los desechos del celoma, por medio del ano, que se encuentra en la parte terminal.
- Sistema Nervioso: Es ganglionar, posee un par de ganglios supraesofágicos, de los que parte una cadena ganglionar.
- Aparato Reproductor: Es hermafrodita incompleta, no existe diferencia de sexo y no puede autofecundarse. Cada lombriz está dotada con un aparato genital masculino y un aparato genital femenino. El masculino está integrado por los testículos que son las glándulas generadoras de esperma. Su situación es anterior muy cerca de la boca, mientras que el aparato genital femenino ocupa una posición posterior relativa al masculino. Este retiene el esperma producido por el aparato genital masculino de otra lombriz hasta el momento de la fecundación.
- Prolificidad: Dos lombrices sexualmente adultas, en fase de acoplamiento, giran en sentido opuesto la una de la otra pudiendo contactar el aparato

femenino de una con el aparato masculino de la otra. Así, en cada acoplamiento una lombriz recibe el espermatozoide de la otra. La fecundación se efectúa a través del clitelo, cuyas glándulas producen el capullo o la cápsula (cocón). La cápsula tiene un color amarillo verdoso, con unas dimensiones aproximadas de 2 x 3 a 3 x 4 mm, teniendo forma muy parecida a una pera muy pequeña. Por éste emergen las lombrices después de 14 a 21 días de incubación. En el momento del nacimiento las crías rompen la envoltura que ha adquirido un color más oscuro. Al nacer, las lombricitas, cuyo número oscila entre 2 y 21 ejemplares, son de color blanco. Desde ese mismo momento son autosuficientes, comen solas, y solo necesitan para sobrevivir que el sustrato en el que se encuentran sea lo suficientemente húmedo y tierno para ser chupado por su boca minúscula.

2.6.5 Utilización de la lombriz *Eisenia fetida*

Según Díaz (2002), la explotación de la lombriz Roja ha adquirido mucha relevancia en los últimos años debido a su utilización como:

- a) Medio de descontaminación ambiental: al alimentarse de materiales biodegradables en descomposición, los cuales excreta como humus o lombricompost. Esta actividad puede realizarse tanto para residuo doméstico como para residuo industrial.
- b) Mejoradora de suelo: La incorporación directa de lombrices en el suelo mejora la calidad de los mismos, ya que la lombriz cava túneles internos por medio de los cuales se facilita el ingreso y retención de humedad, y al mismo tiempo, se evita la erosión en los mismos.
- c) Producción de humus: Se trata de un excelente abono para los suelos que puede sustituir a los fertilizantes agroquímicos, además de que genera ingresos adicionales para el productor.
- d) Carnada para pesca: Se utiliza la lombriz viva, que puede ser la que sobra de los cultivos de lombriz.
- e) Alimentación de aves, peces, ranas y lagartos, en criaderos: La lombriz se puede utilizar viva o adicionada en forma de harina al concentrado

utilizado para la alimentación de estos animales, el cual fortifica con su alto contenido de proteínas.

- f) Alimentación humana: Debido a su alto valor proteico, la lombriz se utiliza en forma de harina, para complementar la alimentación humana.
- g) Fabricación de antibióticos: En la industria farmacéutica se utiliza el colágeno presente en el líquido celomático de la lombriz, para la fabricación antibióticos para tratamiento de afecciones de la piel en los humanos.
- h) Cosmetología: En la fabricación de cremas.
- i) Investigaciones científicas: La medicina ha puesto en estudio a este anélido por su capacidad de regeneración de tejidos (no sangra al ser cortada) y su inmunidad al medio que la rodea (no contrae ni transmite enfermedades).

2.7 Vermicomposteo

Se entiende por vermicomposteo las diversas operaciones relacionadas con la cría y producción intensiva de lombriz, y el tratamiento, por medio de éstas, de residuos orgánicos para su reciclaje en forma de abonos (Iñiguez *et al.*, 2006). Es un proceso de descomposición natural, similar al compostaje, en el que el material orgánico, además de ser atacado por los microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras, etc.) existentes en el medio natural, también lo es por el complejo sistema digestivo de la lombriz (Hernández *et al.*, 2008).

En el intestino de la lombriz 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. Esta transformación hace que los niveles de pérdida de elementos nutritivos como nitrógeno, potasio, etc., sean mínimos con relación a los sistemas tradicionales de compostaje. El resultado son dos productos de alta calidad: el humus y la biomasa de las lombrices (Domínguez *et al.*, 2001).

Las lombrices deben procesar los residuos al menos durante tres meses. En ese lapso la materia orgánica se reduce a estiércol o humus de lombrices que requerirá otros tres meses de curado (estacionamiento) durante los cuales bacterias y hongos completan la humificación de la materia orgánica (Schuldt *et al.*, 2007).

2.7.1 Método de cría

La lombriz vive en lechos o cúmulos de desechos que constituyen su casa y su alimento al mismo tiempo. Es evidente que habrá que poner mucha atención en cómo se disponen estos lechos, tarea que constituye la primera fase y la más importante de todo el proceso. Hay diversos métodos para criar lombriz: desde la utilización de tolvas, tanques y cajones de madera o plásticos, hasta fosas cavadas en campo abierto (González, 2006). El mejor sistema consiste en el cultivo al aire libre, en lechos colocados directamente sobre cualquier tipo de terreno, sin instalaciones ni estructuras de ningún tipo, del modo más sencillo y menos costoso. Las formas de cultivo pueden ser: explotaciones familiares, en pequeña escala y explotaciones industriales, en gran escala (Díaz, 2002).

2.7.2 Materias primas

El proceso de vermicomposteo, favorecido por la acción transformadora de la lombriz y como método de reciclaje, es ideal para el tratamiento tanto de las deyecciones animales, como los residuos urbanos de tipo orgánico, ya que, además de acelerar el proceso de generación de abonos orgánicos de calidad, evita la contaminación del ambiente (Castillo *et al.*, 2000).

En términos generales, existen tres clases principales de residuos orgánicos apropiados para el proceso de vermicomposteo: residuos de origen animal, de plantas, y urbanos. El patrón de crecimiento de las lombriz epigénica *Eisenia fetida* en diferentes residuos orgánicos ha sido investigado por diversos autores bajo condiciones controladas (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos 2000; Amir *et al.*, 2003; Schuldt *et al.*, 2005; Mathur *et al.*, 2005). Entre los diferentes materiales que se han utilizado

como sustrato para el desarrollo de lombriz *Eisenia fetida* se destacan los estiércoles de vaca, caballos, cerdos, de aves de corral, conejo y borregos, también se han utilizado residuos de plantas (pastos composteados, recortes municipales, malezas de ríos, de especies vegetales, café molido) y residuos municipales (biosólidos, y sobrantes de restaurantes y supermercados) (Gunadi y Edwards, 2003).

Por otro lado, aunque una amplia gama de materiales, principalmente diferentes tipos de estiércol se han utilizado para el crecimiento y desarrollo de lombriz, Gunadi y Edwards (2003) determinaron que no es recomendable el uso de estiércol fresco, pues bajo estas condiciones la temperatura de las camas tiende a incrementarse, afectando la sobrevivencia de estos organismos.

La lombriz solo profundiza en el sustrato 30 cm, el que se divide en tres: en la parte superior del sustrato se alimentan, en la parte de en medio ovopositan y en la inferior defecan (Toccalino *et al.*, 2005). Las lombrices *Eisenia fetida* consumen su propio peso en alimento (Schuldt *et al.*, 2007), o sea que consume aproximadamente 1 g de sustrato diario, excretando el 60 % en forma de humus (0.6 gramos diarios) y el restante 40% es asimilado por la lombriz.

2.7.3 Estiércol de Caballo

Todo el estiércol es excelente como alimento especialmente el de los herbívoros porque son ricos en celulosa, carbohidratos y bacterias que desdoblan y ayudan al proceso digestivo de la lombriz, siempre y cuando ya hayan superado la etapa de fermentación, que se caracteriza por la producción de calor y de metano. En general el estiércol de caballo contiene (Díaz, 2002).

- 42.0 % de proteínas
- 0.7 - 2.77 % de nitrógeno
- 30 – 60 % de materia orgánica (celulosa, vitaminas, minerales, etc.).

El estiércol de equino es óptimo por su alto contenido de celulosa. La principal característica es su alta porosidad que lo hace un material muy accesible al manejo con lombriz. Su contenido nutricional al igual que el de todos los estiércoles depende de la calidad de los materiales consumidos, de lo cual dependerá igualmente al final del proceso la calidad nutricional del humus de lombriz. Con el uso de este estiércol es posible obtener un humus de excelente presentación por su textura (González, 2006).

2.7.4 Patologías y Enemigos de la lombriz

La lombriz californiana es un animal muy confiable dado que no sufre ni transmite enfermedades. Tampoco produce impacto ecológico ante una eventual fuga a un medio natural. En cambio es común encontrar daños ocasionados por las condiciones de la cuna. Puede ocurrir que el hábitat sea alterado por la acción de bacterias, aire, calor o frío, así como también escasez o abundancia de agua. Otras causas pueden ser por lesiones e infecciones producidas por acción de insectos o parásitos, la presencia de moscas y mosquitos, ciempiés, bichos bolita u hormigas. Si la lombriz es herida cerca del clitelo puede infectarse y morir. La muerte del animal provoca una pequeña fermentación que causa daño a otras lombrices (Pineda, 2006).

Sin embargo, el hombre se encuentra entre los principales enemigos de la lombriz. En estado silvestre, la daña con el uso de antiparasitarios, insecticidas y abonos químicos. En el criadero, los parásitos son un indicador de un manejo incorrecto por parte del lumbricultor (por lo general baja humedad y lecho demasiado ácido). Entre los depredadores directos de las lombrices se encuentran las ratas, ratones, serpientes, sapos, pájaros, topes, ciempiés, milpiés, y algunos otros, que pueden causar serios daños en el criadero si no se colocan defensas apropiadas (Pineda, 2006).

2.7.5 Inoculación de lombriz

El lombricultivo se inicia depositando (sembrando) el pie de cría en las camas. La siembra consiste en incorporar manualmente la lombriz a los lechos una vez realizadas las pruebas que garanticen el estado óptimo del sustrato. No deben inocularse todas las lombrices al mismo tiempo, primero debe probarse el sustrato (González, 2006).

2.7.6 Prueba de supervivencia

Antes de hacer la siembra del pie de cría sobre el sustrato con el cual se prepararon las camas, es importante garantizar que el material utilizado reúna las condiciones requeridas para la lombriz. Debe realizarse entonces la prueba que se denomina: de adaptación o supervivencia, conocida comúnmente como Prueba de 50 lombrices (P50L). Para ello se utiliza cualquier recipiente, con agujeros de drenaje en el fondo, donde se deposita una capa del alimento de unos 10 centímetros de grosor sobre el cual se colocan 50 lombrices entre adultas y jóvenes agrupadas en el centro de la caja.

Si al cabo de 24 horas las lombrices están en buen estado se puede continuar el proceso. Debe dejarse que la lombriz se introduzca sola, no preocuparse por cubrirlas. La lombriz al introducirse tratará de descubrir si el nuevo ambiente es adecuado para garantizar primero su permanencia y después su acción productiva y reproductiva. Pasadas 24 horas hay que verificar si las 50 lombrices se encuentran en condiciones óptimas, es decir si están vivas. La condición ideal es que estén vivas la totalidad de la lombrices (González, 2006).

Algunos lombricultores consideran aceptable encontrar máximo dos lombrices muertas, cuando las otras 48 están en condiciones normales. Su muerte pudo haberse producido por efectos de la manipulación desde la adquisición hasta el momento de la prueba. Si mueren más de dos quiere decir que el sustrato no reúne aún las condiciones adecuadas y hay que proceder a realizar las correcciones. Por el contrario si todas las lombrices

están vivas o al menos 48 y se han distribuido dentro del material, el sustrato ha sido correctamente preparado y se puede proceder a la inoculación del resto de las lombrices dentro de las camas (González, 2006).

2.7.7 Factores del manejo

Los factores del manejo en el vermicomposteo son:

- a) Humedad: La humedad de las camas debe ser estable, la óptima oscila entre 80 a 85%. Las camas no deben estar empapadas ni saturadas ya que ello limita la cantidad de oxígeno, ni muy secas ya que esto impide la alimentación normal de las lombrices (Parthasarathi, 2007).
- b) pH: El óptimo en las camas es 7, aunque se adaptan a pH entre 4.5 - 8. Si el pH es ácido se puede corregir con una aplicación de 300 cc de carbonato de calcio por m² (Clavería-Cacheo, 2005).
- c) Temperatura: La especie *Eisenia fetida*, es resistente a cambios bruscos dentro de su hábitat. La temperatura óptima está entre 18 y 28 °C. Hay que tener cuidado con el material sin previa descomposición ya que la fermentación del mismo en la cama aumenta el calor (hasta 70°C) y ello puede ser crítico. La temperatura óptima para la formación de cocones es entre 12 y 15 °C (Toccalino *et al.*, 2004).
- d) Luz: Los lechos deben cubrirse con paja ó sacos de yute, no con láminas ni productos impermeables que impiden el paso de aire, tampoco es recomendable que los lechos estén expuestos al sol, ya que la lombriz tiende a morir con los rayos ultravioleta y huye de la luz. Entre menos luminosidad será más beneficioso para las lombrices, ya que tapando la superficie la lombriz puede comer el sustrato de arriba (Pineda, 2006).
- e) Aireación: Puede vivir con bajas cantidades de oxígeno y en presencia de altas concentraciones de CO₂, pueden estar sumergidas en agua pero por lapsos cortos de tiempo, preferentemente deben estar en medios con suficiente oxígeno. Si la aireación no es la adecuada el consumo de alimento se reduce, además el apareamiento y reproducción debido a la compactación (Pineda, 2006).
- f) Drenaje: Se recomienda que las cajas ó lechos donde se cultive la lombriz tengan un buen drenaje en el fondo, por ejemplo haciéndoles

agujeros, esto para que no se produzcan encharcamientos que aumenten la humedad dentro de los mismos (González, 2006).

- g) Riego: El sustrato debe regarse semanalmente durante un mes para que se oxigene y esté listo para recibir a la lombriz. Puede utilizarse riego manual o por aspersión, dependiendo de la cantidad del mismo. Si el contenido de sales y de sodio en el agua de riego es muy elevado, dará lugar a una disminución en el valor nutritivo de vermicompost. Los encharcamientos deben evitarse ya que el exceso de agua desplaza el aire del material y provoca fermentación anaeróbica (Hernández *et al.*, 2006).
- h) Alimentación: Se debe utilizar únicamente material orgánico ya descompuesto, de modo que la temperatura interior de la mezcla no exceda los 25 °C. Los desechos frescos se fermentan produciendo calor (hasta 70°C) y gases tóxicos, lo que podría matar a la lombriz. La altura del sustrato debe ser de 15 cm en verano y 25 cm en invierno, el cual deberá cambiarse cada siete días para fomentar en la lombriz el deseo de acoplamiento y aumentar la producción del cultivo, ya que se sabe que la lombriz se aparea por la noche, después de comer (Roca, 2003).
- i) Tamaño de la partícula: La descomposición puede ser acelerada por la molienda de los materiales porque permite mayor superficie de contacto facilitando la invasión microbiana (Díaz, 2002).

2.7.8 Etapas

Las etapas del proceso general del vermicomposteo son la selección de los materiales, el mezclado y la reducción del tamaño, el pre-composteo, la digestión, la recolección y el almacenamiento. Enseguida se describe más a fondo cada uno de ellos (Castillo *et al.*, 2002):

- En la 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 llevarán a cabo los procesos de vermicomposteo.

- Mezclado y reducción del tamaño, los materiales se mezclan para su homogenización, procurando guardar entre ellos una porción del volumen que pueda 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.
- 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.
- La digestión, la degradación de los residuos orgánicos 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 aireación y la acción; mientras que el material es mezclado con las secreciones de la mucosa intestinal y los microbios para convertirlos en vermicompost.
- En la recolección. El material procesado por las lombrices (vermicompost) se va extrayendo del recipiente o lecho empezando por el que esté en el fondo. Este material sigue teniendo lombrices por lo que es necesario retirarlas del material con cuidado y depositarlas en otro sustrato. Finalmente se seca a temperatura ambiente.

El producto final, el humus de lombriz conocido también como “vermicompost”, 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 el vermicompost (Abd-Manaf *et al.*, 2009).

2.7.9 El papel de la lombriz

La lombriz de tierra es consumidor voraz de residuos orgánicos y aun cuando sólo utiliza sólo una pequeña porción para la síntesis de su cuerpo, ella excreta una gran parte de los residuos consumidos en una forma medio digerida. Puesto que los intestinos de la lombriz contiene una amplia gama

de microorganismos, enzimas, hormonas, etc., estos materiales medio digeridos se descomponen rápidamente y son transformados a una forma de vermicompost en un período de tiempo corto (Quintero-Lizaola *et al.*, 2003).

Hoy en día existen evidencias de que la lombriz de tierra provoca diferentes efectos benéficos, físicos, químicos y biológicos, sobre el suelo y diversos investigadores han demostrado que estos efectos pueden incrementar el crecimiento de la planta y el rendimiento de los cultivos tanto en ecosistemas naturales como en los ecosistemas manipulados. Estos efectos se han atribuido al mejoramiento de las propiedades y estructura del suelo, a una mayor disponibilidad de los elementos nutritivos para las plantas, y a una creciente población microbiana y metabolitos biológicamente activos, como los reguladores de crecimiento de la planta (Atiyeh *et al.*, 2000).

La lombriz, durante el proceso de alimentación, fragmenta los residuos, incrementan la actividad microbiana y los índices de descomposición y/o mineralización de los residuos orgánicos, alteran las propiedades físicas y químicas de los materiales, provocando un efecto de composteo o humificación mediante el cual la materia orgánica inestable es oxidada y estabilizada. El producto final, comúnmente llamado vermicompost es obtenido conforme los residuos orgánicos pasan a través del intestino de la lombriz, y es bastante diferente al material original (Atiyeh *et al.*, 2000)

Mientras los microorganismos son responsables de la degradación bioquímica de la materia orgánica en el proceso de vermicomposteo, la lombriz es importante para acondicionar el sustrato y promover la actividad microbiana. La lombriz actúa como batidora mecánica, ya que ésta desintegra el material orgánico, incrementa el área superficial expuesta a los microorganismos y mueve los fragmentos y excrementos ricos en bacterias, en consecuencia homogeniza el material orgánico (Domínguez *et al.*, 2001). Adicionalmente, la actividad de las lombrices en el proceso de vermicomposteo es tanto física/mecánica y bioquímica. Los procesos mecánicos incluyen: aeración del sustrato, mezclado, y molienda. El

proceso bioquímico es afectado por la descomposición microbiana del sustrato en el intestino de la lombriz (Castillo *et al.*, 2005).

La aplicación de la lombriz a los residuos orgánicos acelera la estabilización de estos materiales en términos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, generando un medio más apropiado para el crecimiento de las plantas (Azarmi *et al.*, 2008). Por lo tanto, el empleo de la lombriz de tierra en la descomposición de una amplia gama de residuos orgánicos, incluyendo lodo de agua negra, desechos de animales, residuos de cultivos, y residuos industriales, para generar vermicomposts se ha incrementado de manera considerable (Chaudhuri *et al.*, 2000; Cardoso-Vigueros *et al.*, 2008; Muthukumaravel *et al.*, 2008).

2.8 Vermicomposteo de lodo residual

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, la lombriz *E. fetida* facilita la estabilización de los biosólidos a consecuencia de su actividad, pues con sus galerías mantiene la aireación 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 bioxidación del sustrato (Ndegwa y Thompson, 2000).

Algunas especies de lombriz, como la propia *Eisenia fetida*, tiene 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 el lodo residual (Conder *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2003). Del mismo modo, la lombriz es capaz de eliminar microorganismos patógenos y parásitos presentes en el lodo residual, pues cuando el residuo atraviesa su intestino, los microorganismos depredadores ahí presentes reducen las poblaciones de bacterias como *Salmonella spp.*, y *Escherichia coli*, al igual que esporas y quistes de otros parásitos (Eastman *et al.*, 2001; Gunadi y Edwars, 2003; Godfree y Farrell 2005; Durán y Henríquez 2007; Droppelmann *et al.*, 2009).

Cabe mencionar que la EPA (2000) ha clasificado el vermicompost 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 NOM 503. Esta clasificación permite la aplicación del vermicompost de los biosólidos al suelo sin ninguna restricción.

2.9 El vermicompost

El vermicompost es un tipo de compost (Alidadi *et al.*, 2007) en la cual cierto tipo de lombriz de tierra, *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei*, *Lumbricus rubellus*, transforman los residuos orgánicos en un subproducto estable denominado “vermicompost” o “*worm casting*”. El vermicompost - lombricompost o humus de lombriz - se genera en el tubo digestor de la lombriz, y de acuerdo al uso que se destine, se puede clasificar como: fertilizante orgánico, mejorador del suelo y medio de crecimiento para especies vegetales.

La descomposición de la materia orgánica bajo condiciones ambientales variables es una característica fundamental de los ecosistemas terrestres (Fauziah y Agamuthu, 2009). En el caso del vermicomposteo, las interacciones complejas entre residuos orgánicos, microorganismos, lombriz y otros animales de la fauna del suelo provocan la biooxidación y estabilización de dichos residuos. Una gran variedad de microorganismos y

organismos invertebrados del suelo proliferan e interactúan contribuyendo al "ciclo de la materia" dentro del vermicomposteo. El sistema de vermicomposteo soporta complejas cadenas alimenticias, y al mismo tiempo, modifica diferentes formas químicas de diversos elementos nutritivos contenidos en los compuestos orgánicos, los cuales son importantes para la dinámica de los elementos nutritivos (Domínguez *et al.*, 2001).

En términos generales una descripción del vermicompost sería la siguiente (Delgado-Arroyo, 2004; Gajalakshmi y Abbasi, 2004; Moreno-Reséndez y Cano-Rios, 2004):

Material de color oscuro, con un agradable olor a mantillo de bosque, su gran bioestabilidad evita su fermentación o putrefacción, contiene una elevada carga enzimática y bacteriana que incrementa la solubilidad de los elementos nutritivos, liberándolos en forma paulatina, y facilita su asimilación por las raíces e impide que éstos sean lixiviados con el agua de riego manteniéndolos disponibles por más tiempo en el suelo y favorece la germinación de las semillas y el desarrollo de las plantas. Incrementa la superficie activa de las partículas minerales favoreciendo la CIC de los suelos. Favorece e incrementa la actividad biótica del suelo. Su acción antibiótica aumenta la resistencia de las plantas en contra de plagas, enfermedades y organismos patógenos. Se puede utilizar sin inconvenientes en estado natural y se encuentra libre de nematodos. Los ácidos húmicos y fúlvicos que contiene regeneran las características químicas del suelo y, al igual que cierto tipo de hormonas de crecimiento, favorecen el desarrollo de las especies vegetales. Posee un pH neutro. Mejora las características estructurales del terreno, desliga suelos arcillosos y agrega suelos arenosos. Durante el trasplante previene enfermedades y evita el choque por heridas o cambios bruscos de temperatura y humedad. Amortigua el efecto de los compuestos químicos aplicados al suelo. Aumenta la retención hídrica de los suelos (4 – 27%) disminuyendo el consumo de agua por los cultivos.

El vermicompost se caracteriza por estar conformado por materiales finamente divididos con gran porosidad, aireación drenaje, capacidad de retención de humedad. Además presentan una gran área superficial, la cual le permite adsorber y retener fuertemente los elementos nutritivos, los cuales se encuentran en formas que son fácilmente asimilables para las plantas tales como nitratos, fósforo intercambiable, potasio, calcio y magnesio solubles. También contienen sustancias biológicamente activas tales como reguladores de crecimiento vegetal, que estimulan el crecimiento de las plantas e impiden la proliferación de organismos patógenos. (Atiyeh *et al.*, 2000). En consecuencia, los vermicompost pueden tener un gran potencial en las industrias hortícolas y agrícolas como sustrato para el crecimiento de la planta (Atiyeh *et al.*, 2000; Delgado-Arroyo *et al.*, 2004; Ancona-Méndez *et al.*, 2006).

2.1 Importancia de las propiedades químicas

El lodo residual, al igual que otros materiales como el suelo, presenta ciertas características químicas. En el caso del lodo residual, debido a su origen, estas características en la mayoría de las ocasiones, impiden que pueda ser utilizado como abono orgánico por su impacto sobre el suelo, la salud del hombre y el ambiente. Entre las principales propiedades químicas que presentan tanto el suelos como el lodo residual destacan el pH, Conductividad Eléctrica (CE), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Materia Orgánica, Nitrógeno Total, etc (Esteller, 2002).

2.10.1 pH

Es una propiedad que tiene influencia indirecta en los procesos químicos, disponibilidad de los elementos nutritivos, procesos biológicos y actividad microbiana. Es definido como el logaritmo inverso de la actividad de iones hidrógeno en la solución suelo. Normalmente el rango de pH de los suelos varía entre 3.5 a 9.0, la razón por la que no se alcanza valores extremos de 0 ó 14 se debe a que la solución suelos no es una solución verdadera, sino una solución coloidal. El pH de un suelo es el resultado de múltiples factores, como el tipo de minerales presentes en un suelo,

meteorización, humificación, dinámica de elementos nutritivos entre la solución y los retenidos por los agregados y a las propiedades de los agregados del suelo y en especial lo que se denomina intercambio iónico (Sánchez, s/f).

Por su parte, durante el vermicomposteo la mayoría de los residuos orgánicos empleados como sustratos tienden a acidificarse. Debido a que las lombrices son sensibles a las fluctuaciones de acidez, el pH del sustrato o medio de crecimiento debe mantenerse entre 5 y 9 para su supervivencia (NMX-FF-109-SCFI-2007).

2.10.2 Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica (CE) de un suelo o sustrato es la medición de sales solubles presente cuyas unidades son los $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. Las sales solubles relativa promedio que contienen los suelos son: calcio, magnesio, potasio, sodio, cloruros, nitratos y fosfatos, éstas controlan la presión osmótica de la solución del suelo. La determinación de la conductividad eléctrica específica depende del número de iones que contiene la muestra que se está analizando. A medida que la concentración iónica disminuye la conductividad eléctrica es menor; sin embargo, si la conductividad eléctrica es elevada, es porque la concentración de sales solubles ha aumentado. La conductividad baja es evidencia de que la velocidad de movilización de elementos químicos es baja o de que algunos de ellos están totalmente ausentes en las muestras (López y López, 1985).

2.10.3 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Es una propiedad química que designa los procesos de adsorción de cationes por el complejo de cambio desde la solución suelo y liberación de cationes desde el complejo de cambio hacia la solución suelo. Esta propiedad es atribuida a la arcilla (coloide mineral) y al humus (coloide orgánico), de manera que la CIC, está influenciada por la cantidad y tipo de arcilla, la cantidad de humus y el pH o reacción del suelo. Se expresa en $\text{meq}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ (Sánchez, s/f).

Los principales cationes que ocurren en forma intercambiable en el suelo son: Aluminio, Magnesio, Potasio, Sodio y Calcio, cuya concentración depende de la cantidad de materia orgánica presente en el sustrato. El vermicompost presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo cual se debe a la presencia de grupos carbonilos e hidroxilos fenólicos y alcohólicos, entre otros, en su estructura (Moreno-Reséndez, 2005).

2.10.4 Materia Orgánica (MO)

La materia orgánica está constituida por restos y productos de descomposición de plantas, animales y residuos orgánicos contenidos en el lodo residual (Alidadi *et al.*, 2005). Por lo tanto, el porcentaje de materia orgánica presente en el vermicompost está estrechamente vinculado con su fertilidad ya que influye en la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Félix *et al.*, 2008)

Los principales elementos nutritivos como nitrógeno, azufre y 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, grasa y resinas. Aproximadamente el 56% del humus es carbono, 35% oxígeno, 3.55% hidrógenos y 5% nitrógeno. Su coloración es casi negra de un olor fresco y de estructura parecida al suelo (Pineda, 2006).

2.10.5 Nitrógeno Total (NT)

Los compuestos nitrogenados se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Las fuentes de nitrógeno incluyen además de la degradación natural de la materia orgánica, fertilizantes, productos de limpieza y tratamiento de agua potable. Debido a que el nitrógeno es un elemento nutritivo para organismos fotosintéticos, es importante el monitoreo y control de descargas del mismo al ambiente (NMX-AA-026-SCFI-2001).

El nitrógeno total está compuesto por el nitrógeno amoniacal más nitrógeno orgánico, y éste está constituido por las formas de nitrógeno correspondientes al nitrato, nitrito y amonio. La medición de éste, proporciona una idea de las reservas del suelo en nitrógeno y se obtiene la relación carbono/nitrógeno, que tiene la importancia para conocer el grado de evolución de la materia orgánica y disponibilidad del nitrógeno para los microorganismos y plantas (Sardiñas-Peña y Pérez-Cabrera, 2004).

Según Santamaría-Romero *et al.* (2001), el Nitrógeno Total puede incrementarse en las etapas finales del composteo por efecto de la pérdida de material orgánico o disminuir por la pérdida de $N-NH_3$, por el lavado del sustrato mantenido durante el proceso. De acuerdo con Durán y Henríquez (2007) el vermicompostaje tiene un marcado efecto sobre la transformación del N en los materiales iniciales. La mineralización del N es mayor en presencia de lombrices, lo que sugiere que éstas producen condiciones que favorecen la nitrificación, excretando también una cantidad importante en forma de amonio y muco-proteínas.

2.10.6 Relación Carbono: Nitrógeno (C:N)

La relación C:N es de suma importancia para el desarrollo de la población microbiana presente en el vermicompost. Esta relación es un indicador del grado de resistencia a la descomposición de la materia orgánica en los composts. Los microorganismos emplean 30 partes de C por una parte de N en su actividad vital. En la medida en que la relación de C/N es mayor de 30/1 la materia orgánica demora más en descomponerse e inversamente en la medida que C/N es menor de 30/1 la materia orgánica se descompone más rápidamente, se eleva su temperatura bruscamente y puede quemarse y el Nitrógeno perderse en forma de gas (NH_3) (Ducasals, 2002).

El lodo es deficitario de carbono, la razón C:N se encuentra entre 5:1 y 20:1 (Castillo *et al.* 2002). Su disminución durante el vermicomposteo se debe al consumo del carbono y nitrógeno por parte de la población microbiana presente en el proceso; lo que puede interpretarse como un aumento en el grado de la 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 (Sardiñas-Peña y Pérez-Cabrera, 2004).

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización geográfica

La Región Lagunera se localiza en la parte central del norte de México. Se encuentra ubicada entre los meridianos 101° 40' y 104° 45' de longitud Oeste y los paralelos 25° 05' y 26° 54' de latitud Norte. La altitud de esta región sobre el nivel del mar es de 1,139 m (Schmidt, 1989).

3.2 Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en una bodega del área de producción de vermicomposteo 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 Mayo – Octubre de 2009.

3.3 Condiciones del lugar del experimento

El experimento se realizó en una bodega de forma rectangular, con las siguientes dimensiones: 6.5 m de largo por 5.5 m de ancho. La estructura se diseñó a base postes de madera y tubos galvanizados, cubierto el contorno con distintos materiales reciclables como pedazos de madera y láminas, costales y hojas de palma washingtonia (*Washingtonia robusta*). Este último material fue utilizado principalmente en el techo de la estructura.

3.4 Materias primas y organismos utilizados

En este experimento se utilizaron como sustratos lodo residual y estiércol de equino, con el propósito de proporcionar una cantidad balanceada de carbono (C) y nitrógeno (N), con los cuales se generaron las mezclas de los tratamientos evaluados.

3.4.1 Lodo residual

Los Lodos Residuales empleados en este proyecto, provinieron de los asentamientos de la planta tratadora de agua residual de la industria metalúrgica 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 Estiércol de caballo

El estiércol seco de caballo que se utilizó en el experimento, se obtuvo de las unidades pecuarias de la ciudad de Nazas, Durango. Para uniformizar el tamaño de la partícula se utilizó una criba de 0.5 cm, haciendo pasar por ella este material, y el cual una vez cribado se recolectó en costales de material plástico de 50 kg.

3.4.3 Lombriz *Eisenia fetida*

La lombriz *Eisenia fetida* fue empleada para este experimento. Las razones por la que se fundamenta la utilidad de la lombriz roja son, de acuerdo Tocalino *et al.*(2005):

- 1) Longevidad: viven aproximadamente 16 años.
- 2) Prolificidad: puede llegar a producir bajo ciertas condiciones, hasta 1500 pequeñas lombrices por año.
- 3) Deyecciones: es un excelente abono orgánico con una riqueza en flora bacteriana de prácticamente el 100% (2×10^{12} unidades formadoras de colonias $\bullet g^{-1}$ de excretas).
- 4) Es un animal que desarrolla todo su ciclo biológico en un ambiente de no más de 30 cm de sustrato.
- 5) No se fuga del criadero, no cava galerías verticales, sino que circulares y deja el humus (deyecciones) dentro de las galerías.

La lombriz se obtuvo del banco de germoplasma que se maneja en la universidad UAAAN – UL. Las lombrices que se utilizaron para realizar la estabilización del lodo residual fueron organismos jóvenes con el clitelo desarrollado.

3.4.4 Unidad experimental

Las unidades experimentales se establecieron en tambos de plástico de 200 litros cortados en forma vertical con una dimensión de 90 x 55 x 28 cm de largo, ancho y alto respectivamente. Estas unidades se colocaron alrededor de una altura de 0.8 m sobre el nivel del suelo, utilizando para tal fin una estructura a base de madera con una inclinación más o menos de 30 grados y cada uno de ellas con aproximadamente 150 orificios en la parte inferior para facilitar el drenaje. El agua de desecho, fue recolectada en el exterior con un tubo de PVC, con un diámetro aproximado de 10 cm, el cual fue cortado de forma vertical de acuerdo a las dimensiones de largo de la unidad, permitiendo así que el lixiviado se recolectara en recipientes de plástico de 1 L.

Para evitar la proliferación de insectos dentro de los recipientes, éstos se cubrieron con plástico transparente durante los 120 días que duró el proyecto. Para cada tratamiento se utilizaron 4 unidades experimentales, a manera de repeticiones.

3.4.5 Composición de los sustratos

Los materiales descritos en el apartado 3.4, se combinaron en diferente proporción para dar origen a los cuatro tratamientos evaluados en este experimento. La composición de los tratamientos se presenta en el cuadro 3. El tratamiento 1, que consistió solamente sustrato con lodo residual, fue considerado como el tratamiento testigo. El lodo residual puede ser utilizado como alimento por la lombriz (Domínguez *et al.*, 2001).

3.5 Desarrollo del experimento

3.5.1 Ensayos preliminares

Antes de realizar la inoculación de la lombriz *Eisenia fetida* se realizaron algunas actividades después de colocar los sustratos en las unidades experimentales como estabilizar la temperatura, humedad, aireación y drenaje de los recipientes, principalmente en los tratamientos que contenían estiércol. De acuerdo a la literatura, se realizó una prueba de supervivencia en los sustratos, pero lamentablemente no generó resultados favorables, ya que hubo una mortalidad del 100 %, razón por la que la inoculación de la lombriz en los sustratos tardó aproximadamente 30 días, con relación a la colocación de los sustratos en las unidades experimentales.

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

Tratamiento	# de Unidades experimentales	Inoculación de lombrices <i>Eisenia fetida</i> por unidad	Relación (Volumen:Volumen)	
			Lodos residuales	Estiércol seco de caballo
T1	4	100 Individuos	1	0
T2	4	100 Individuos	2	1
T3	4	100 Individuos	1	2
T4	4	100 Individuos	0	1

Una vez logrado la estabilización de los factores ya mencionados, se procedió a la inoculación de la lombriz, colocando primero diez especímenes para ver la reacción que éstos tenían. Al ser favorables los resultados, se procedió a inocular el resto de lombriz a las 24 hr hasta completar 100 individuos de *Eisenia fetida* por unidad en cada tratamiento

3.5.2 Riego

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 el 80 %) ya que la lombriz no sobrevive a mezclas que contengan el 93% de humedad (Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos, 2002). En ocasiones para reducir el consumo de agua limpia, se utilizó el agua drenada que se fue acumulando en los recipientes de plástico que se colocaron para este fin.

3.5.3 Aireación

Durante todo el experimento, la remoción de los sustratos se realizó cada tercer día de manera manual, para el cual se utilizó guantes de látex, como medida de seguridad. El mezclado fue necesario para homogenizar los sustratos de crecimiento, facilitando la presencia del aire para favorecer el proceso de descomposición y/o biotransformación del lodo residual y evitar la presencia de olores desagradables (Rodríguez-Quiroz y Paniagua-Michel, 2004).

3.5.4 Registro de temperatura y pH

Este parámetro fue registrado cada tercer día. Para lo cual se utilizó un termómetro metálico de rango de -10 a 260 °C y el pH se determinó usando tiras indicadoras de pH, de la marca Fermont®.

3.5.5 Muestreo

Durante el desarrollo del experimento se hicieron cuatro muestreos a los 0, 30, 60, 90 y 120 días después de haber realizado la colocación de los sustratos en los recipientes de plástico. En cada muestreo se obtuvieron aproximadamente 250 g del sustrato de cada unidad para obtener aproximadamente 1 kg de muestra por tratamiento, y generar una muestra homogénea y representativa. Las muestras obtenidas se colocaron en bolsas de plástico con la identificación respectiva de cada tratamiento y se procedió a secarlos y trasladarlos al Laboratorio de Suelos de la misma institución para sus análisis.

3.6 Variables evaluadas

Para determinar el efecto de las lombrices sobre los diferentes sustratos evaluados, además de contabilizar el número de organismos sobrevivientes al finalizar el experimento, también se determinaron las siguientes características químicas sobre las muestras de los sustratos: pH, CE, CIC, MO y N Total.

3.6.1 Metodología de los análisis químicos

Antes de proceder el 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 ésta establecido para cada una de las propiedades químicas que fueron evaluadas. Las técnicas empleadas para el análisis de las muestras fueron las siguientes:

- pH y Conductividad Eléctrica:

Estas dos determinaciones se pesaron 250 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 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

- Capacidad de Intercambio Catiónico.

Una vez cribada la muestra con el tamiz de malla 0.2 mm, se pesaron 4 g 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 BaCl_2 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 BaCl_2 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 un 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 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:

$$CIC_{\text{meq}} \cdot 100 \text{ g}^{-1} = \frac{(mL_{\text{gastotestigo}} - mL_{\text{gastomuestra}})(N_{\text{EDTA}})(10000)}{\text{Pesodelsuelo}(\text{Alícuota})}$$

- Materia Orgánica.

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 0.3 g de suelo, 10 mL de Dicromato de Potasio 1 N, 5 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 0.3 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 10 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 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 y como indicador se aplicaron 10 gotas de ferroína. La titulación se realizó con disolución de FeSO_4 , virando a color rojo.

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:

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

Para obtener el porcentaje de carbono total, se consideró el valor obtenido en el porcentaje de materia orgánica y se dividió entre la constante con valor de 1.724.

- Nitrógeno Total

La determinación del nitrógeno total se dividió en tres partes: digestión, destilación y titulación. Para realizar la digestión se pesaron, 0.4 g de la muestra que contenían lodos residuales y 0.5 g de la muestra de estiércol de caballo en una balanza analítica de la marca Ohaus Explorer®, sobre un 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 H_2SO_4 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 Kjeldahl 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:

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

IV.- RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante análisis de regresión polinómica para definir la tendencia de los parámetros evaluados a través del tiempo. Para determinar el efecto de la lombriz sobre los diferentes sustratos evaluados, además de contabilizar el número de organismos sobrevivientes al finalizar el experimento, se determinaron los siguientes parámetros químicos de los sustratos: pH, CE, CIC, MO y N Total, con cinco diferentes muestreos a los 0, 30, 60, 90 y 120 días, pero cabe mencionar que en el segundo muestro aun no se habían inoculado las lombrices *Eisenia fetida*, debido a que hasta este tiempo se estabilizaron los diferentes factores que afectan al vermicomposteo.

4.1 Dinámica del pH en los sustratos vermicomposteados

En relación a los resultados obtenidos del variable pH, se puede apreciar que durante el experimento se presentaron altibajos en los valores registrados. En la figura 1 se aprecia que los valores iniciales de los cuatro tratamientos oscilaron entre 6.4 y 7.4. Conforme transcurrió el tiempo, se observó que a los 60 días (primer mes de inoculadas las lombrices) se alcanzaron los valores máximos de pH en todos los tratamientos, siendo para T1 = Lodo Residual de 7.63; para T2 = Lodo Residual: Estiércol de caballo (2:1; V:V) 8.2; para T3 = Lodo Residual: Estiércol de caballo (1:2; V:V) de 8.66 y para T4 = Estiércol de caballo 8.71.

En el día 90, los tratamientos presentaron un comportamiento de disminución en los valores de pH. El T1 registró una disminución de 7.2 %, el T2 4.3 %, el T3 6 % y T4 5.5 %. En el día 120, los tratamientos T1 y T4 tuvieron un comportamiento diferente que los T2 y T3, ya que los primeros

mostraron una tendencia a incrementar el valor de esta variable y en los segundos, los valores continuaron disminuyendo. A pesar que al final los tratamientos tuvieron diferente comportamiento, todos se mantuvieron dentro del rango de alcalinidad, siendo similares a los valores de pH de 7 y 8 obtenidos por Suthar (2009) en el vermicomposteo de residuos domésticos.

En función a la dinámica de comportamiento de pH del T1, se destaca que el proceso de vermicomposteo, en el cual tiene una participación fundamental la lombriz *Eisenia fetida* provocó un cambio significativo en esta variable como lo afirma Rodríguez-Quiroz y Paniagua-Michel (2004), ya que inicialmente el pH fue ligeramente ácido y terminó siendo neutro, como consecuencia de la degradación de ácidos orgánicos y el efecto amortiguador de la materia orgánica (Delgado-Arroyo *et al.*, 2004), siendo el ideal para el uso de este material como sustrato para cultivos de vivero y forestales (Ducasals, 2002).

Los valores de pH reportados en el presente trabajo se encuentran dentro del rango recomendado para la supervivencia de la lombriz, el cual según Pineda (2006) debe oscilar entre 5 y 8.4; siendo el ideal de 7 (neutro).

Los mayores valores de pH en los tratamientos T3 y T4 pueden asociarse a la participación de la lombriz en los procesos de descomposición del lodo residual, ya que cuando las secreciones de las glándulas calcíferas presentes en estos organismos, se mezclan con el dióxido de carbono, producido por la respiración, se forma carbonato de calcio. Este compuesto básico aparentemente influyó en el pH del sustrato coincidiendo con lo que determinó Rodríguez-Valadares (2004), quien obtuvo valores de pH básicos al realizar el vermicomposteo de mezclas de biosólidos y residuos urbanos con *E. fetida*.

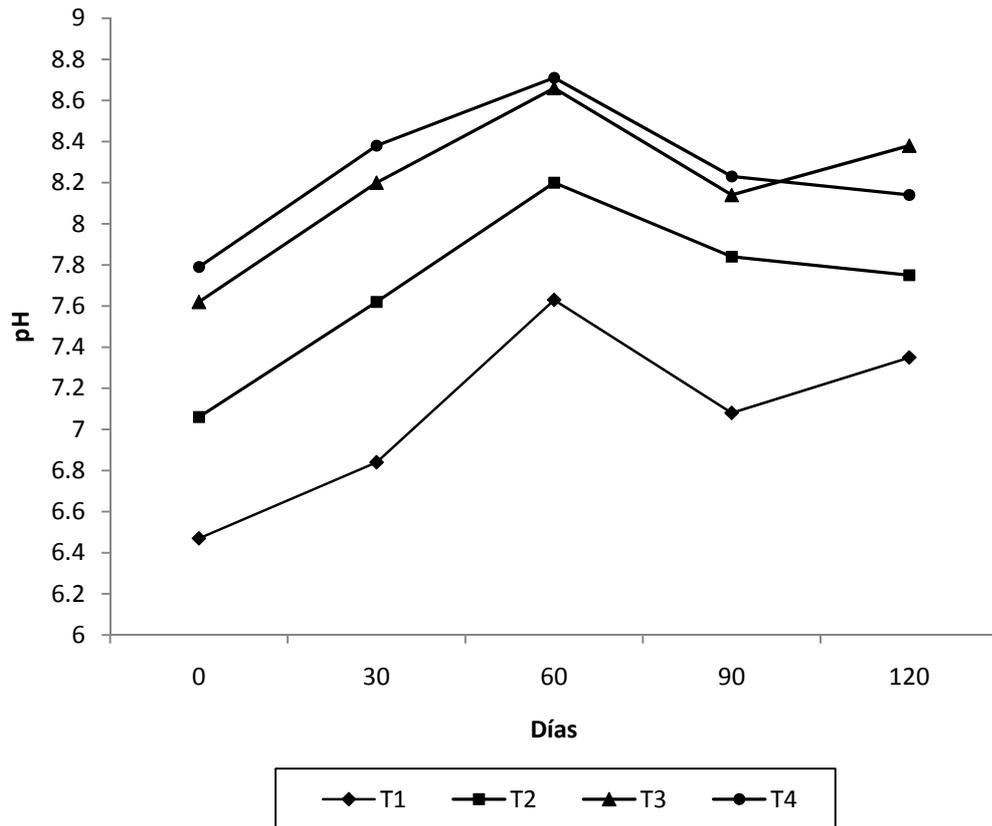


Figura 1. Comportamiento del pH durante el vermicomposteo con *E. fetida*

El incremento de pH registrado a los 60 días para los tratamientos provocó que el valor de R^2 de las ecuaciones de regresión presentara ajustes reducidos (cuadro 4) sin embargo, las ecuaciones obtenidas reflejan lo que anteriormente se señaló, de que el pH, a través del tiempo tiende a reducirse, dado que la pendiente presentó valores negativos.

Cuadro 4. Análisis de regresión polinómica del comportamiento del pH en los sustratos evaluados

Tratamiento	Y	R^2
T1	$-0.11X^2 + 0.86X + 5.704$	0.7074
T2	$-0.16X^2 + 1.12X + 6.094$	0.8931
T3	$-0.1186X^2 + 0.8574X + 6.932$	0.702
T4	$-0.155X^2 + 0.985X + 7$	0.81

4.2 Dinámica de la Conductividad Eléctrica en los sustratos vermicomposteados

El comportamiento de la Conductividad Eléctrica (CE), ver figura 2, en el T1 al inicio presentó una CE de $6.85 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, alcanzando su valor máximo al día 60 con un incremento del 78.8 % con respecto a su valor inicial y para el día 120 presentó una disminución del 15.3% de unidades de CE con relación a su valor máximo. En el T2 su valor inicial fue de $10.54 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ y conforme transcurrieron los días tendió a aumentar hasta alcanzar un incremento de 54.1% al día 120. El T3, el comportamiento fue de $9.25 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ al iniciar el trabajo, al día 30 presentó un aumento del 53.08 % y conforme fueron pasando los días presentó comportamiento regular, teniendo una disminución solamente del 3.2 % para el día 120, con relación a su valor máximo obtenido el día 30. En el T4 esta variable tuvo altibajos, ya que al inicio su valor fue de $13.74 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, teniendo durante el resto de los días incrementos y disminución en su valor hasta finalizar con una reducción del 10.1 % al día 120, con respecto a su valor inicial.

En función a la dinámica del comportamiento de la CE en este trabajo, se observó que el T1 y T3 tuvieron un comportamiento similar. El valor de la CE más bajo se presentó en el T1, como lo reportan Santamaria *et al.*, (2001) en un experimento similar donde obtuvieron vermicompost y compost a partir del residuos orgánicos con cantidades variables de lombriz *E. andrei*.

Según Durán y Henríquez (2007), en el proceso de vermicompostaje se pueden obtener niveles altos de sales, debido a las condiciones protegidas en las que se lleve a cabo el proceso, en comparación con aquellos vermicompostajes expuestos a la lluvia, en donde puede ocurrir el lavado y la subsiguiente pérdida de lixiviados. Los valores obtenidos en este trabajo resultaron inferiores, en comparación con los que registró Auxilia *et al.*, (2003) en la transformación de lodo residual de una empresa productora de papel en abono orgánico (humus), siendo éste de $3.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, pero comparados con Contreras-Ramos *et al.* (2005) resultaron superiores, ya que estos autores registraron intervalos de CE entre 5 y $9 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ en su

trabajo de vermicomposteo con *E. fetida* en mezclas compuestas de estiércol de bovino y paja de avena.

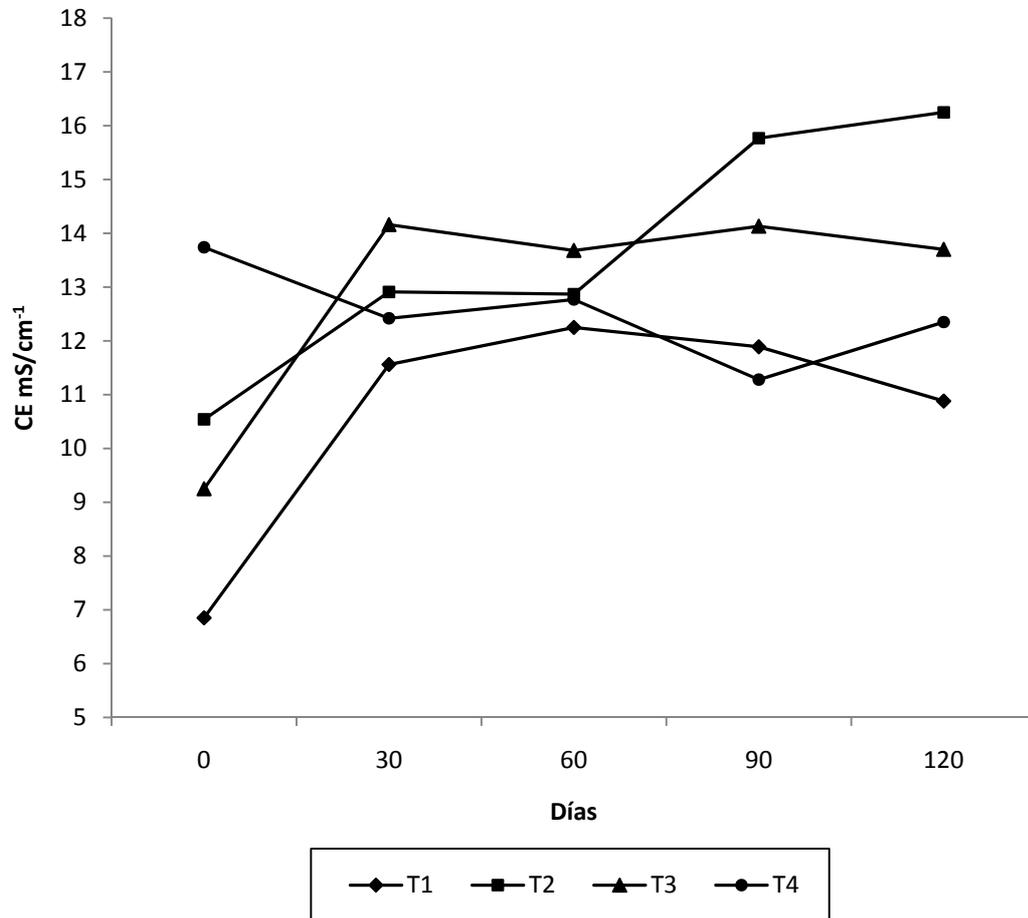


Figura 2. Comportamiento de la CE durante el vermicomposteo con *E. fetida*

La variabilidad de la CE en los tratamientos a través del experimento, ocasionó que los valores de la R^2 de las ecuaciones de regresión presentaran un ajuste mayor (cuadro 5) a excepción del tratamiento T4, a su vez las ecuaciones obtenidas demuestran lo que anteriormente se señaló, de que el incremento que presentaron los T2 y T3 al final fueron factores que redujeran la estabilidad, mientras que el T1 originó que se redujera la salinidad de los sustratos.

Cuadro 5. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la CE en los sustratos evaluados

Tratamiento	Y	R ²
T1	$-0.8921X^2 + 6.1919X + 1.924$	0.9366
T2	$-0.06X^2 + 1.788X + 8.964$	0.9258
T3	$-0.6964X^2 + 5.0656X + 5.448$	0.8311
T4	$-0.21X^2 - 1.652X + 15.158$	0.6888

4.3 Dinámica de la Capacidad de Intercambio Catiónico en los sustratos vermicomposteados

En la figura 3, se presenta la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de los sustratos evaluados y se aprecia que en el T1 su valor inicial fue de 18 meq•100 g⁻¹ presentando un incremento considerable de 44.4 % al finalizar el experimento. En cambio la CIC del T2 al inicio fue de 16 meq•100 g⁻¹, llegando a obtener su valor máximo al día 90 con un incremento del 62.5 % pero al final presentó una disminución del 18.75 %. En el T3, el valor inicial fue de 18 meq•100 g⁻¹, teniendo un incremento máximo a los días 60 y 90 del 27 % y disminuyendo al final 11 %. En el T4, su valor inicial fue de 20 meq•100 g⁻¹, teniendo una tendencia negativa durante todo el proceso, y registrando una reducción del 30 % como valor final.

Bajo las condiciones en que se manejó el experimento, se puede establecer que el mejor tratamiento fue el T1 con 26 meq•100 g⁻¹. Al respecto de la capacidad de intercambio catiónico, Contreras-Ramos-Ramos *et al.*, (2005) reportan las mismas tendencias de CIC registradas en el presente experimento al incrementarse esta variable durante un experimento de vermicomposteo de biosólidos con estiércol de vaca y paja de avena en diferentes proporciones utilizando la lombriz *E. fetida*.

Como se mencionó anteriormente, el T1 presentó una tendencia a incrementar los valores de CIC, pero sin embargo el máximo valor alcanzado de $26 \text{ meq}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ para esta variable al término del día 120 resultó inferior al valor de $62.02 \text{ meq}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$ determinado por Cardoso-Vigueros y Ramírez-Camperos (2002).

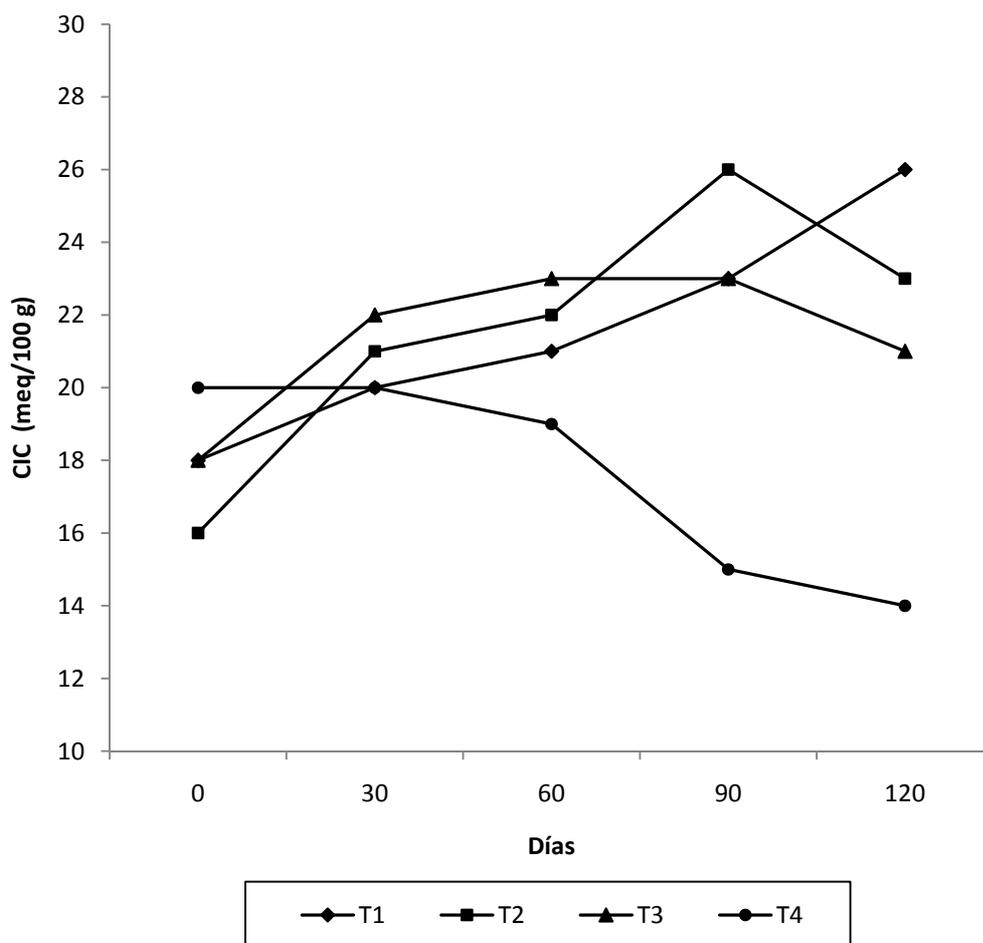


Figura 3. Comportamiento de la CIC durante el vermicomposteo con *E. fetida*

El aumento de la CIC registrada a los 90 días para la mayoría de los tratamientos provocó que los valores de la R^2 de las ecuaciones de regresión polinómica presentaran un ajuste adecuado (cuadro 8). La ecuación positiva obtenida para el T1, refleja que durante el proceso este tratamiento tuvo una tendencia a incrementar esta variable.

Cuadro 6. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la CIC en los sustratos evaluados

Tratamiento	Y	R ²
T1	$0.2143X^2 + 0.6143X + 17.4$	0.9877
T2	$-0.9286X^2 + 7.4714X + 9.4$	0.9055
T3	$-0.9286X^2 + 6.2714X + 12.8$	0.9867
T4	$-0.3571X^2 + 0.4429X + 20.2$	0.9243

4.4 Dinámica de la Materia Orgánica en los sustratos vermicomposteados

La dinámica del comportamiento del porcentaje de materia orgánica (MO) en los tratamientos T1, T3 y T4 presentaron un incremento de MO en el primer mes de haber sido inoculada la lombriz *E. fétida*, ya que en el día 60 el T2 reflejó una disminución (6.53 %). Igualmente, en las últimas etapas (del día 60 al 120) del experimento el porcentaje empezó a disminuir en todos los tratamientos.

En la figura 4, se obtuvo que el T1 presentó el mayor porcentaje de MO cuyo valor inicial fue de 25.48 %, incrementando al día 60 un 39.5 % pero a partir de esta fecha disminuyó el valor de esta variable 5.3 % con respecto a su valor inicial. El T2, presentó un incremento de 5.5 % al día 60, teniendo una disminución al final del experimento de 9.9 % con respecto a su valor inicial. En el T3, el comportamiento fue similar al T1, teniendo un incremento de 58.4 % al día 60 y una disminución de 21.1 % en la última etapa del experimento, en relación al valor inicial de 19.3 %. En el tiempo que duró el experimento, el T4 presentó una tendencia negativa, ya que siempre tuvo disminución en el valor de esta variable, llegando a perder el 22.9 % con respecto al valor inicial.

Los incrementos de la materia orgánica en los tratamientos T1 y T3 que presentaron al primer mes de haberse inoculado las lombrices, se pudo haber debido a que las lombrices, durante el proceso de alimentación, fragmentan los residuos, incrementan la actividad microbiana y los índices

de descomposición y/o mineralización de los residuos orgánicos, alteran las propiedades físicas y químicas de los materiales, provocando un efecto de composteo o humificación mediante el cual la materia orgánica inestable es oxidada y estabilizada . (Moreno-Reséndez y Cano-Rios 2004). En relación a los descensos del porcentaje de MO al final del experimento, según Sainz *et al.* (2000) pudieron haberse debido a la acción combinada de las lombrices y microorganismos en el consumo de los elementos.

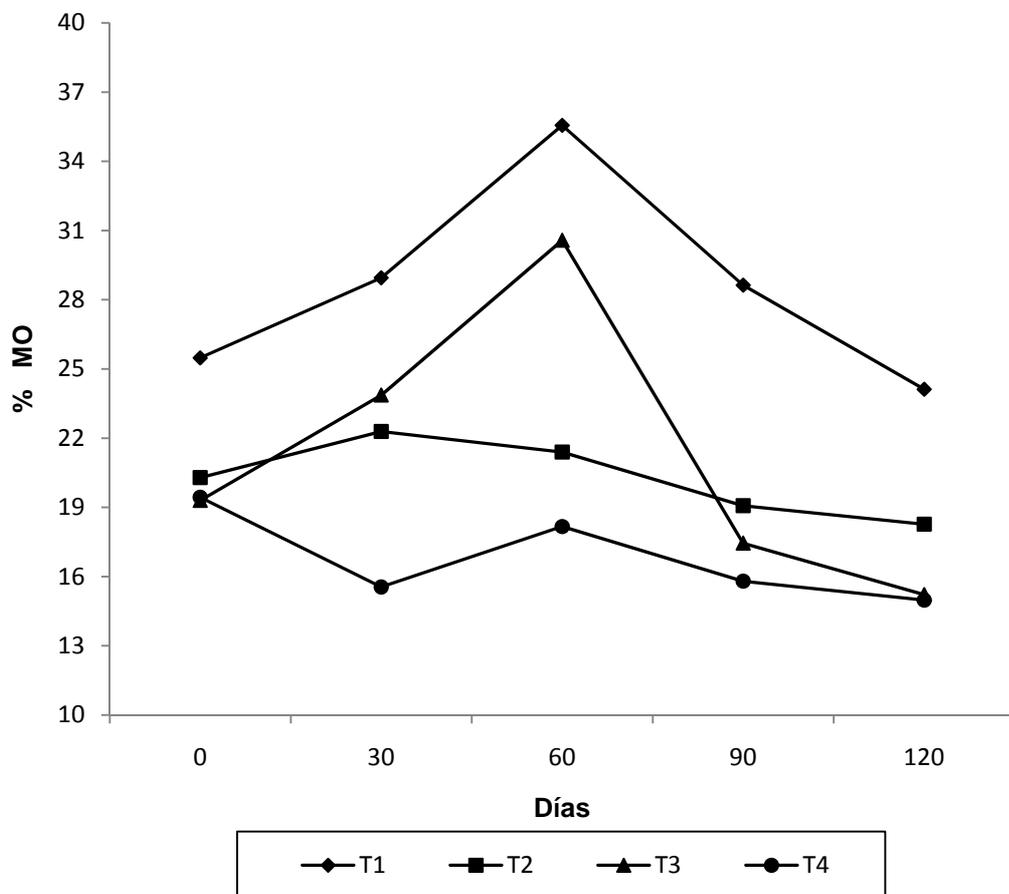


Figura 4. Comportamiento de la MO durante el vermicomposteo con *E. fetida*

El aumento de MO observado a los 60 días para los tratamientos T1y T3, ocasionó que el valor de la R^2 de la ecuación de regresión presentara un ajuste reducido (cuadro 7), ya que las ecuaciones obtenidas reflejan, lo que anteriormente se señaló, que la MO a través del tiempo tiende a disminuir.

Cuadro 7. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la MO en los sustratos evaluados

Tratamiento	Y	R ²
T1	$-2.1071X^2 + 12.339X + 14.71$	0.8051
T2	$-0.5029X^2 + 2.2911X + 18.922$	0.816
T3	$-2.3886X^2 + 12.873X + 8.938$	0.681
T4	$0.0821X^2 - 1.3599X + 19.964$	0.5171

Los resultados obtenidos comparados con los de otros investigadores difieren considerablemente en el porcentaje de materia orgánica; por ejemplo Iñiguez *et al.*, (2006) en la evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos y bagazo de agave durante el compostaje obtuvieron como resultado 85.3 % de MO; Esteller (2002) en una comparación de abono vacuno y lodo residual, encontró que el abono vacuno contenía 48.24 % y el lodo residual 61.9 5% de MO. Sin embargo, comparado con Torres *et al.* (2007) en el compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de agua residual valores obtenidos resultaron similares, ya que estos autores registraron valores de 16.7 y 22. 4 % de MO.

Sin embargo, si se considera la clasificación que se hace a los suelos con respecto al contenido porcentual de MO, el porcentaje determinado en el experimento en el T1 se clasifica de muy alta, tomando en cuenta que se trata de vermicompost con alto contenido de MO. Por lo cual, de acuerdo a Gil *et al.* (2001) los lodos residuales una vez que se incorporan a diversas regiones, especialmente en zonas áridas y semiáridas podrían ayudar a combatir la degradación de estos suelos y contribuir a elevar su nivel de fertilidad.

4.5 Dinámica del comportamiento de la variable Carbono Total en los sustratos vermicomposteados

El Carbono Total (CT) es una variable que tiene amplia relación con el contenido de materia orgánica. En la figura 5, se presenta la dinámica del comportamiento del Carbono Total, en el cual los resultados obtenidos de los tratamientos estudiados en el experimento son que el caso del T1 y T3 presentaron un comportamiento similar, registrando su valor máximo el día 60 con un incremento de 39.6 % y 59.7 % y luego teniendo una disminución ambos tratamientos al final del experimento en relación a su valor inicial.

En el caso del T2, no presentó mucha variación en los valores obtenidos entre inicio y fin del experimento, ya que solamente se registró un incremento de 12 % en el día 30 y un descenso del 10.71 % en el día 120 con respecto a su valor inicial. El T4, tuvo un comportamiento siempre en descenso, ya que comparado con los otros tratamientos, éste siempre presentó valores bajos durante todo el experimento, presentando como valor final 8.68 %, con una reducción del 22.98 % con respecto a su valor inicial.

Los valores obtenidos en esta variable y en especial los de T1 son similares a los que obtuvieron Torres *et al.* (2007) registrando un valor de 9.8 % en el experimento de compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de agua residual. Igualmente, Quinchía y Carmona (2004) en su experimento sobre la factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de agua residual combinada, registraron valores de 15 % de carbono orgánico.

El comportamiento inestable de los tratamientos a lo largo del proceso, provocaron que el valor de la R^2 de la ecuación de regresión presentara un ajuste reducido (cuadro 8), ya que las ecuaciones obtenidas reflejan, lo que anteriormente se señaló, que esta variable a través del tiempo tiende a disminuir, ya que está estrechamente relacionada con la MO.

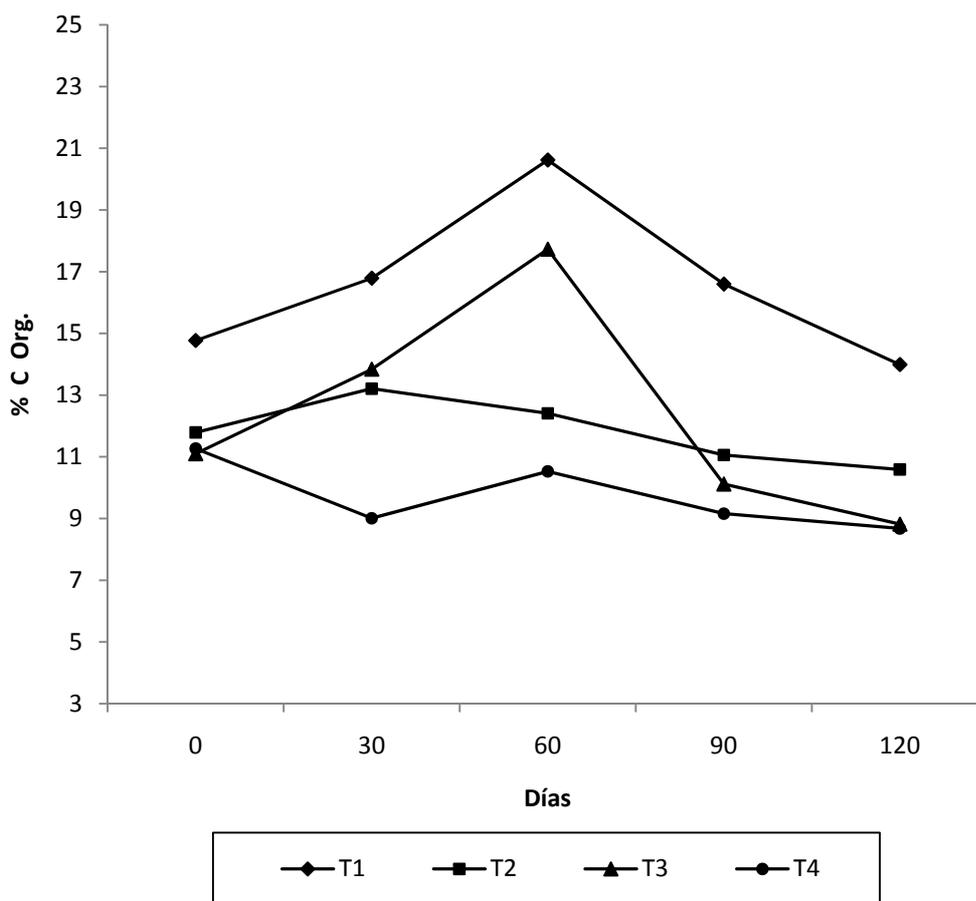


Figura 5. Comportamiento del % de Carbono Orgánico durante el vermicomposteo con *E. fetida*

Cuadro 8. Análisis de regresión polinómica del comportamiento del CT en los sustratos evaluados

Tratamiento	Y	R ²
T1	$-1.2221x^2 + 7.1579x + 8.524$	0.8053
T2	$-0.3093x^2 + 1.4007x + 11.012$	0.78
T3	$-1.3986x^2 + 7.5634x + 5.016$	0.6827
T4	$0.0479x^2 - 0.7901x + 11.574$	0.5168

4.6 Dinámica del comportamiento de la variable Nitrógeno Total en los sustratos vermicomposteados

La dinámica del N Total se presenta en la figura 6, en el que se observa que el T1, fue distinto a los demás tratamientos, ya que éste registró el mayor porcentaje de Nitrógeno Total (NT) durante todo el experimento, con un valor inicial de 3.36 %, pero una vez depositada la lombriz *Eisenia fetida* sobre este sustrato, descendió 41.96 % en su valor final. En los T2 y T3, estos tratamientos presentaron un comportamiento similar al inicio, con un valor no mayor al 1.1 %, después tuvieron altibajos en los valores, teniendo al final un comportamiento distinto en ambos, ya que el T2 incremento 27.27 % y el T3 disminuyó un 7 % con respecto a su valor inicial. El tratamiento T4, presentó como valor inicial 0.99 % NT, pero al día 30 registró una reducción del 66.66 %, después se mantuvo constante, teniendo un incremento del 50 % al final del experimento pero sin embargo comparado con su valor inicial mostró una reducción del 33.33 %.

De acuerdo con la literatura, el comportamiento del T1 es similar a lo que obtuvieron Torres *et al.* (2007) en el compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales registraron un valor de 1.73 % de NT e igualmente Alidadi *et al.* (2007) en el proceso de compostaje y lombricultura combinada en el tratamiento y bioconversión de lodos registraron un valor de 1.71% de NT.

El comportamiento diferente de cada tratamiento dio como resultado que la mayoría de ellos presentarán una R^2 con ajuste reducido (Cuadro 9), pero a pesar de eso las ecuaciones muestran que a partir de los 90 días de haber inoculado las lombrices, esta variable tiende a incrementarse, ya que se registran valores positivos.

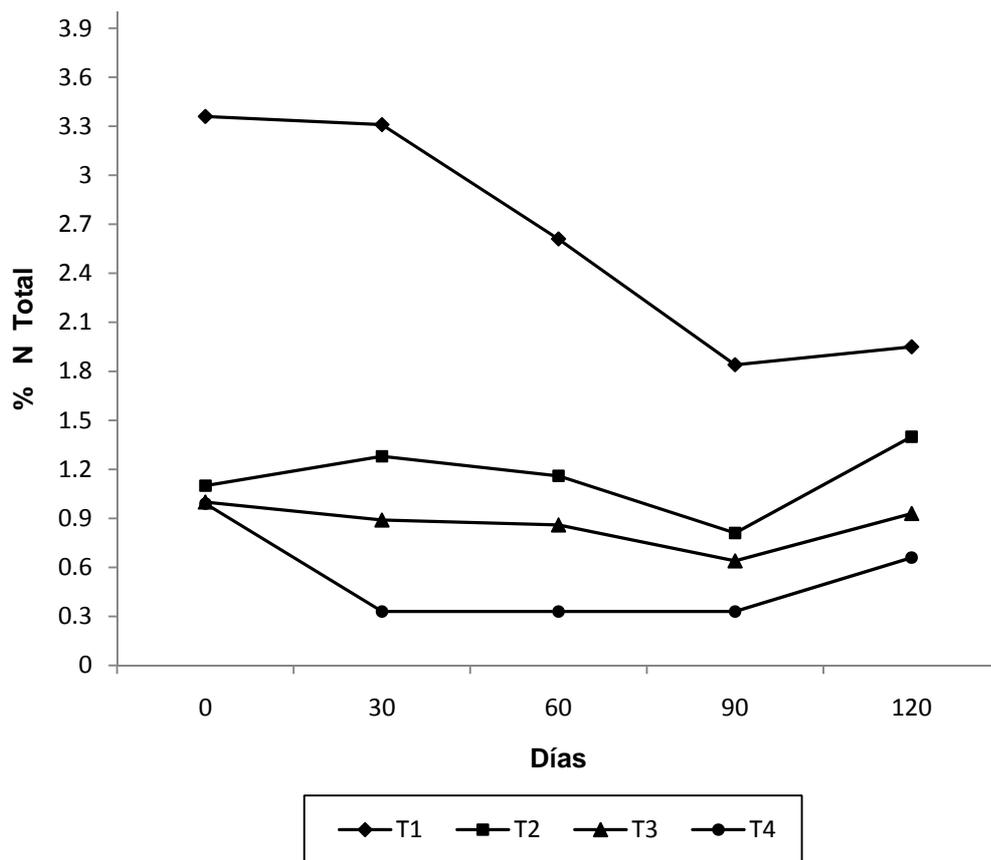


Figura 6. Comportamiento del % de Nitrógeno Total durante el vermicomposteo con *E. fetida*

Cuadro 9. Análisis de regresión polinómica del comportamiento del NT en los sustratos evaluados

Tratamiento	Y	R ²
T1	$0.0179x^2 - 0.5361x + 4.026$	0.8866
T2	$0.0421x^2 - 0.2399x + 1.406$	0.1344
T3	$0.0436x^2 - 0.3004x + 1.286$	0.5669
T4	$0.1414x^2 - 0.9146x + 1.716$	0.9286

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

En la figura 7 se observa que los cuatro tratamientos tuvieron altibajos presentando un incremento de la relación C:N en el día 60 los tratamientos T3 y T4, mientras que los tratamientos T1 y T2 el incremento se registró hasta el día 90. El T1 mostró un incremento de 105 %; el T2 solo fue del 27.45 % mientras que los tratamientos T3 y T4 registraron incrementos del 85.67 % y 180.31 % con respecto a sus valores iniciales. Al finalizar el experimento, el T4 fue el más alto con un valor de 13.42 y el tratamiento más bajo fue el T1 con un valor de 7.17, en comparación con los que presentó Iñiguez *et al.* (2006) en la evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos y bagazo de agave durante el compostaje y Torres *et al.* (2007) en el compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de agua residual son similares, siendo este de 7.9 y 7.1 en la relación C:N

Adicionalmente, en la relación C:N, el tratamiento con estiércol (T4), mostró el valor mayor, debido posiblemente a las alta cantidad de fibra remanente que proviene de la dieta de los animales y que en cierta forma, permanece en buena cantidad en la materia prima utilizada (Durán y Henríquez, 2007). Pero para el caso del T1, el valor final en este experimento es similar al que reportaron Quinchía y Carmona (2004) en sustratos conformados por 72% biosólido, 18% cachaza y 10% de residuos de Poda y Torres *et al.* (2007) en el compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de agua residuale, presentando una relación C:N de 7 y 8, respectivamente.

El aumento de la relación C:N que presentaron algunos tratamientos durante el proceso fue favorable, ocasionando que el valor de la R^2 mostrara un ajuste considerable (cuadro 10) a excepción del tratamiento T2 que el valor de R^2 fuera reducido, sin embargo las ecuaciones obtenidas demuestran lo que anteriormente se suponía, de que las relaciones C:N a través del tiempo tienden a disminuir al presentar la pendiente valores negativos.

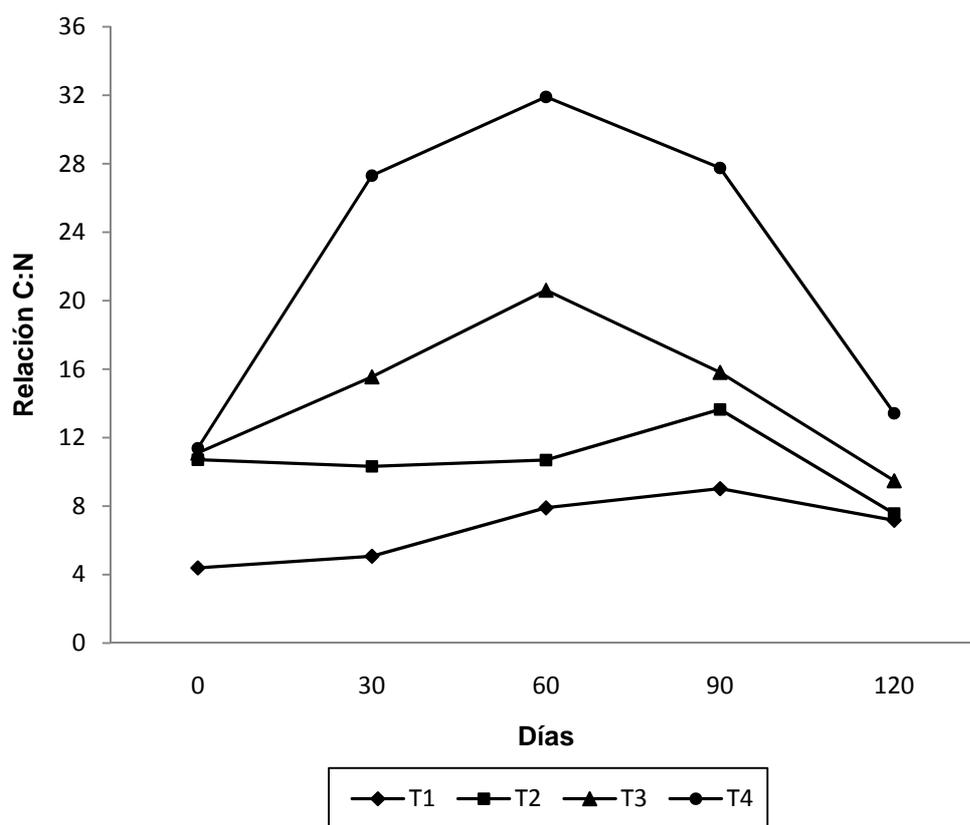


Figura 7. Comportamiento de la Relación C:N durante el vermicomposteo con *E. fetida*

Cuadro 10. Análisis de regresión polinómica del comportamiento de la relación C:N

Tratamiento	Y	R ²
T1	$-0.4836x^2 + 3.8524x + 0.472$	0.8192
T2	$-0.6293x^2 + 3.4787x + 7.072$	0.3447
T3	$-2.2443x^2 + 13.168x - 0.306$	0.9284
T4	$-4.9464x^2 + 30.132x - 13.634$	0.999

4.8 Cuento final de la lombriz *Eisenia fetida* en los sustratos vermicomposteados

En la figura 8 se muestran los valores promedio del número de lombrices *E. fetida* registrados a 90 días de haber sido inoculadas en los tratamientos, los cuales aumentaron considerablemente en todos los tratamientos. Se observa claramente que el T4 superó a los demás tratamientos en el conteo final. En relación a los tratamientos T1, T2 y T3 que son los que contienen lodo residual en diferentes proporciones, mostraron una población aceptable de lombriz. Cabe destacar, que la lombriz que se desarrolló en estos tratamientos, tuvieron individuos de mayor tamaño a comparación con los individuos del T4.

Auxilia *et al.* (2003) registraron una prolificidad de lombriz *E. fetida* en sustratos con proporciones de 80% lodo residual y 20% desechos vegetales o 20% estiércol. Igualmente, Rodríguez-Valadares y Paniagua-Michel (2004) obtuvieron un crecimiento poblacional al usar *E. fetida* en sustratos de lodo residual y estiércol de bovinos, demostrando que la *E. fetida* tiene la capacidad de adaptarse y reproducirse en cualquier tipo de residuo orgánico.

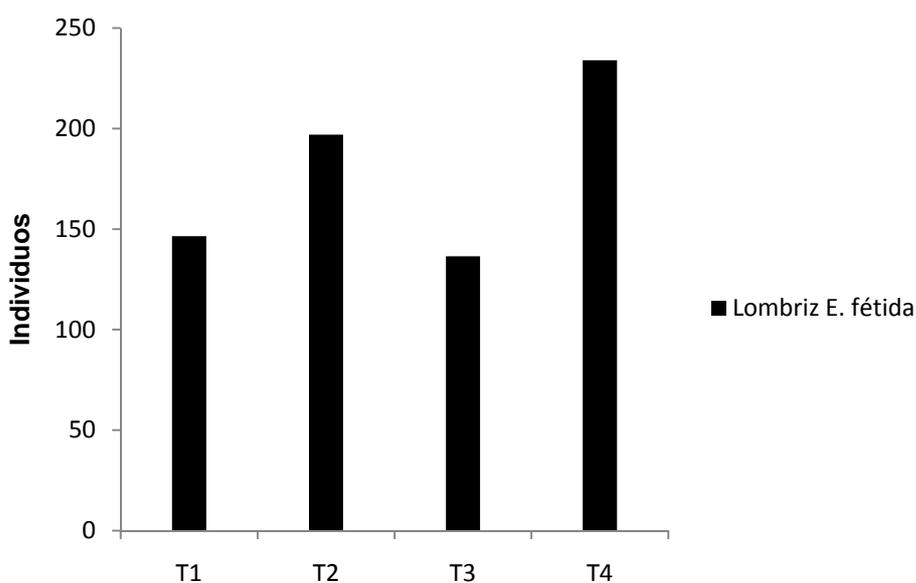


Figura 8. Cuento final de *Eisenia fetida* en los sustratos vermicomposteados

V.- CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones y análisis químicos realizados durante el desarrollo de este trabajo y de la discusión e interpretación de resultados que de ellos se hace, se pueden generar las siguientes conclusiones:

1. Efectivamente el lodo residual provenientes de la planta tratadora de agua residual de la compañía Met-Mex Peñoles de la ciudad de Torreón, Coahuila, México, pueden ser utilizados como medios de crecimiento para la lombriz *E. fetida*.
2. Dados los cambios registrados en las propiedades químicas se considera que el lodo residual pueden ser estabilizado mediante la técnica de vermicomposteo, empleando la lombriz *Eisenia fetida*.
3. De acuerdo con las características presentes del vermicompost producido, éste puede tener un aprovechamiento de la clase C, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

En términos generales, se concluye que el vermicomposteo es una opción ecológica para la estabilización de lodo residual, además de establecer el potencial de la vermicompost resultante de este residuo en la agricultura orgánica como mejorador de suelos o abono, dadas sus características fisicoquímicas, con la ventaja de que no hay límite en la cantidad que se utilice para este uso.

VI.- RESUMEN

Actualmente, la fragilidad de los ecosistemas está bajo presión permanente. El impacto del hombre sobre los ecosistemas ha provocado un incremento desmedido de problemas críticos para el futuro, amenazando la calidad y regulación de las funciones naturales de los recursos suelo, agua y aire de los cuales depende la sustentabilidad.

En México las plantas de tratamiento de agua residual generan grandes cantidades de lodo residual, que deben ser manejados y dispuestos adecuadamente. El uso del lodo residual se basa principalmente en disponerlos en rellenos sanitarios o a cielo abierto, sin contar con un control en su disposición, generando de esta manera problemas de tipo ambiental y económico.

Una forma de reciclar benéficamente el lodo residual es su utilización en la agricultura, ya que son una fuente importante de elementos nutritivos y compuestos orgánicos oxidables que pueden ser aprovechados por el suelo y plantas. Sin embargo, la incorporación al suelo de residuos orgánicos de cualquier naturaleza, requiere que éstos hayan sido previamente tratados de manera apropiada (estabilizados), para minimizar o eliminar efectos adversos y optimizar la eficiencia de estos materiales. El vermicomposteo es un método alternativo de recuperación de recursos, siendo su principal ventaja los bajos costos operacionales además de minimizar la contaminación ambiental así como la obtención de un producto estable, rico en sustancias como el humus. En este sentido, el vermicomposteo es una tecnología innovadora, sencilla, viable y ecológica para el tratamiento de lodos residuales

En este trabajo se empleó la técnica de vermicomposteo, utilizando lombrices *Eisenia fetida* por su versatilidad para el tratamiento de lodos residuales generados de la planta tratadora de aguas residuales de la industria metalúrgica MET – MEX PEÑÓLES S.A. de C.V., y además se evaluó el comportamiento de las propiedades químicas (pH, Conductividad Eléctrica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Materia Orgánica y Nitrógeno Total) de los cuatros tratamientos resultantes de la combinación de lodos residuales y estiércol de caballo (relación V:V) utilizados como sustrato.

Las unidades experimentales por tratamientos fueron inoculados cada uno con 100 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 inicial de los sustratos del experimento y después cada 30, 60, 90 y 120 días. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante regresión polinómica de segundo grado. Se encontró que en el pH la lombriz incrementa la alcalinidad del sustrato; en relación a la CE la concentración de sales tiene una tendencia a incrementar; la CIC se incremento en la mayoría de los tratamientos; aumento y consumo de MO por parte de la lombriz, así como en la relación C:N. La población de lombriz *E. fetida* registró incrementos significativos en los diferentes tratamientos. Las mejores características químicas se registraron en T1 y en la supervivencia y reproducción de la lombriz *E. fetida* el mejor fue T4.

Finalmente, por lo anteriormente señalado, se puede establecer que el uso de las lombrices para compostear los lodos residuales puede ser una excelente alternativa para aprovechar estos desechos en bienes económicamente redituables y de esa manera reducir el impacto negativo sobre el medio natural y la salud humana.

Palabras Claves: Lodo Residual, Biosólido, *Eisenia fetida*, Vermicultura.

VII.- LITERATURA CITADA

- Aalok, A., A. K. Tripathi and P. Soni (2008). Vermicomposting: a better option for organic solid waste management. *J. Hum. Ecol.*, 24(1): 59-64.
- Abd-Manaf, L., M. L. Che-Jusoh, M. Kamil-Yusoff and T. H. Tengku-Ismail (2009). Influences of bedding material in vermicomposting process. *International Journal of Biology*, 1 (1): 81- 91.
- Alidadi, H., A. R. Parvaresh, M. R. Shahmansouri and H. Pourmoghadas (2005). Combined compost and vermicompost process in the treatment and bioconversion of sludge. *J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 2 (4): 251 - 254.
- Alidadi, H., A. R. Parvaresh, M. R. Shahmansouri and H. Pourmoghadas and A. A. Najafpoor (2007). Combined compost and vermicompost process in the treatment and bioconversion of sludge. *Journal of Biological Sciences* 10 (21): 3944 - 3947
- Amir, S., M. Hafidi, I. Lemee, G. Merlina, M. Guiresse, E. Pinelli, J. Revel, J. Bailly and A. Ambles (2003). Characterization of humic acids extracted from sewage sludge during composting and of their Sephadex® gel fractions. *Agronomie*, 23: 269-275.
- Ancona-Méndez, L., V. Pech-Martínez y A. Flores-Novelo (2006). Perfil del mercado de la vermicomposta como abono para jardín en la ciudad de mérida, Yucatán, México. *Revista mexicana de agronegocios*, 10 (19).
- Atiyeh, R. M., S. Subler; C. A. Edwards, G. Bachman, J.D. Metzger, and W. Shuster (2000). Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedobiología*, 44: 579-590.
- Auxilia, M.; K. Celine y Z. Oropeza (2003). Utilización de la lombricultura en la transformación de lodo residual de una empresa productora de papel en abono orgánico (humus). Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Disponible:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/mallia.pdf>
Recuperado: 27 de Septiembre de 2009.

- Azarmi, R., M. Tobarí Giglou and R. Didar- Taleshmikail (2008). Influence of vermicompost on soil chemical and physical properties in tomato (*Lycopersicum esculentum*) field. *African Journal of Biotechnology* 7 (14): 2397 - 2401.
- Brown, S., R.L. Chaney, J.G. Hallfrisch and Q. Xue (2003). Heavy metals in the environment: effect of biosolids processing on lead bioavailability in an urban soil. *J. Environ. Qual.* 32:100–108.
- Cameron E., N. How, S. Surinder and 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.
- Cardoso-Vigueros, L. y E. Ramírez-Camperos (2000). Vermiestabilización de Lodos Residuales y Lirio Acuático”. *Actas del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, ABES. Porto Alegre. Brasil.*
Disponible: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-161.pdf>
Recuperado: 05 de Octubre de 2009
- Cardoso-Vigueros, L. y E. Ramirez-Camperos (2002). Vermicomposting of sewage sludge: a new technology for Mexico. *Water Science and Technology*, 46 (10): 153 - 158.
- Cardoso-Vigueros, L., E. Ramírez-Camperos and E. Violeta-Escalante (2008). Vermicomposting technology for stabilizing the sewage sludge from rural waste water treatment plants. *Water Practice & Technology*, 3 (1): 1 – 9.
- Castillo, A. E., S. H. Quarín. y M. C. Iglesias (2000). Caracterización química y física de compost de lombrices elaborados a partir de residuos orgánicos puros y combinados. *Agricultura Técnica (Chile)* 60: 74-79.

- Castillo, G., C. Alcota C. y M. Pía-Mena (2002). Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
Disponibile:<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=580>
Recuperado: 15 de Octubre de 2009.
- Castillo, A. E, S. G. Benito and M. C. Iglesias (2005). Influence of earthworms on organic waste composting and characterisation of vermicompost end products. Spanish Journal of Agricultural Research, 3: 145 - 150.
- Castrejón, A., J. A. Barrios, B. Jiménez-Cisneros, C. Maya, A. Rodríguez-Valadares y A. González. (2000). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México." Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso. Universidad Nacional Autónoma de México.
Disponibile: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/mexico13/061.pdf>
Recuperado: 30 de Septiembre de 2009.
- Chaudhuri, P. S., T. K. Pal, G. Bhattacharjee and S.K. Dey (2000). Chemical changes during vermicomposting (*Perionyx excavatus*) of kitchen wastes. Tropical Ecology, 41(1): 107 - 110.
- Chhotu, J. and F. Madhusudan H. (2008). Phytoremediation: the application of vermicompost to remove zinc, cadmium, copper, nickel and lead by sunflower plant. Environmental Engineering and Management Journal 7(5): 547 – 558.
- Clavería-Cacheo, C. L. (2005). Estudio de factibilidad para producir harina a partir de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) para ser utilizada en la elaboración de concentrados para animales en Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería Química
Disponibile: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_7002.pdf
Recuperado: 05 de Septiembre de 2009
- Conder, J., R. P. L. and N. T. B. (2001). Assessment of metal availability in smelter soil using earthworms and chemical extractions. J. Environ. Qual, 30: 1231 - 1237.

- Contreras-Ramos-Ramos, M., E. M. Escamilla-Silvia and L. Dendooven (2005). Vermicomposting of biosolids with cow manure and oat straw. *Biol. Fertil. Soils* 41: 190 - 198.
- Corrêa, R., Y. M. F. y F. C. (2007). La producción agrícola mediante compostaje y Vermicompostaje de lodos de depuradora. *Revista Brasileira de Ingeniería Agrícola y Ambiental* 11(4): 420 - 426.
- Cortez-Cadiz, C. (2003). Fundamentos de Ingeniería para el tratamiento de los biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de región metropolitana. Facultad de ciencias químicas y matemáticas. Chile, Universidad de Chile.
Disponible: <http://cabierta.uchile.cl/revista/21/articulos/pdf/rev3.pdf>
Recuperado: 01 de Noviembre de 2009.
- Delgado-Arroyo, M. (2004). Humus de lombriz: caracterización y valor fertilizante. *Lombricultura Pachamama S.A., Universidad de Chile.*
Disponible:<http://www.lombricultura.cl/lombricultura.cl/userfiles/file/biblioteca/humus/CARAC%20Y%20VALOR%20FERTILIZANTE.pdf>
Recuperado: 20 de Octubre de 2009
- Delgado-Arroyo, M., M. A. Porcel-Cots, R. Millares-Hornedo, E. M. Beltran Rodríguez-Valadares, L. Beringola-Beringola. y J. V. Martín-Sánchez. (2004). Efecto de la vermicultura en la descomposición de residuos orgánicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 20 (2): 83 - 86.
- Díaz, E. (2002). *Lombricultura: una alternativa de producción.* Agencia de desarrollo económico y comercio exterior.
Disponible:<http://www.scribd.com/doc/4031482/Adex-Guia-De-Lombricultura>
Recuperado: 11 de Octubre de 2009.
- Domínguez, J.; C. A. Edwards y Subler, S. (2001). A comparison of vermicomposting and composting. *Biocycle*, 38: 57-59.

- Droppelmann, V., C. Pía-Gaete y P. Miranda (2009). Remoción mediante vermicomposteo de los coliformes fecales presentes en lodos biológicos. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*: 124 - 128.
- Ducasals, R. (2002). Producción de biofertilizantes y sus aplicaciones. Agronet.
Disponible:<http://www.agronet.com.mx/cgi/articles.cgi?Action=Viewhistory&Article=3&Type=A&Datemin=2002-12-01%2000:00:00&Datemax=2002-12-31%2023:59:59>
Recuperado: 07 de Octubre de 2009
- 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.
- Eastman, B. R., P. N. Kane, C. A. Edwards, L. Trytek, B. Gunadi, A. L. Stermer and J. R. Mobley (2001). The effectiveness of vermiculture in human pathogen reduction for USEPA biosolids stabilization. *Compost Science and Utilization*, 9: 38-49.
- Environmental Protection Agency EPA (2000). Folletos Informativos de Biosólidos de la EPA.
Disponible:<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IDEntrega=2290>
Recuperado: 12 de Septiembre de 2009
- Escalante, V., L. Cardoso, E. Ramírez, G. Moller, G. Mantilla, J. Montecillos, C. Servin y F. Villavicencio (2002). El reuso del agua tratada en México. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. IMTA.
Disponible: <http://www.cepis.org.pe/bvsacd/agua2003/reus.pdf>
Recuperado: 02 de Octubre de 2009
- Esteller, M. V. (2002). Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura. *Latino Americana de Hidrogeología*: 103 - 113.
- Fauziah S. H. and P. Agamuthu (2009). Sustainable household organic waste management via vermicomposting. *Malaysian Journal of Science*, 28 (2): 135 - 142.

- Félix, J. A., R. Raudel S., G. Rojo M., R. Martínez R. y V. Olalde P. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai*, 4: 57 - 67.
- Gajalakshmi, S. and S. A. Abbasi (2004). Earthworms and vermicomposting. *Indian Journal of Biotechnology*, 3: 486 – 494.
- Gil, F., E. F. de Andres, J.L.Tenorio, F. Martínez and I. Walter (2001). Sewage sludge effects on production of wild legume shrubs. *Bioprocessing of Solid Waste & Sludge*, 1(4): 1 – 10.
- Godfree, A. and J. Farrell (2005). Processes for Managing Pathogens. *J. Environ. Qual.*, 34: 105 - 113.
- González, E. (2006). Fundamentos para el cultivo de lombriz roja californiana. SENA, Colombia.
 Disponible:<http://graeco.iespana.es/biblioteca/FUNDAMENTOS%20PARA%20EL%20CULTIVO%20DE%20LOMBRIZ%20ROJA%20CALIFORNIANA.pdf>
 Recuperado: 20 de Agosto de 2009
- Gunadi, B. y A. Edwards C. (2003). The effects of multiple applications of different organic wastes on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (savigny) (Lumbricidae). *Pedobiología* 47 (4): 321-329.
- Hernández, J. A., S.Pietrosevoli, A. Faría, R. Canelón, R. Palma y J. Martínez (2006). Frecuencia de riego en el crecimiento de la lombriz (*Eisenia* spp) y caracterización química del vermicompost. *UDO Agrícola*, 6: 20 - 26.
- Hernández, J. A., F. Guerrero L., L. E. Mármol C., J. M. Barcenas B. y E. Salas (2008). Caracterización física según granulometría de dos vermicompost derivados de estiércol bovino puro y mezclado con residuos de fruto de la palma aceitera. *Interciencia*, 33: 668 - 671.
- Iñiguez G., J Parra y P. A. Velasco (2006). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos bagazo de agave durante el compostaje. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22: 83 - 93.
- Jurado-Guerra, P., M. Luna-Luna. y R. Barretero-Hernández (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Téc. Pecu. Mex*, 42(3): 379 - 395.

- López, J. y J. López (1985). Diagnostico de suelos y plantas. Ediciones Mundi-prensa, cuarta edición. Pp 44 y 45.
- Mahamud, M. A. Gutiérrez y H. Sastre (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II). Métodos de tratamiento Ingeniería del Agua, 3 (3): 45 - 54
- Mathur, B., L. K. Verma and J. N. SRivas-Lucerotava (2006). Effects of vermicomposting on microbiological flora of infected biomedical waste. ISHWM Journal, 5 (1): 28 - 33.
- Miralles, R., E. M. Beltrán, M. A. Porcel, M. Delgado, M. L. Beringola1, J. Valero M., R. Calvo e I. Walter (2002). Emergencia de seis cultivos tratados con lodo, fresco y compostado, de estaciones depuradoras. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 18: 139 - 146.
- Molina, B, V. Droppelmann, E. Arévalo y H. Moreno (2001). Tratamiento de Lodos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Aeropuerto Arturo Merino Benítez mediante Compostaje y Lombricultura. *In*: actas del XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago.
Disponibile: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis//chile14//lodo.pdf>
Recuperado: 30 de Agosto de 2009
- Moreno-Reséndez A. y P. Cano-Rios (2004). La vermicomposta y su potencial para el desarrollo de especies vegetales, pp 135 - 147. Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción. Torreón, Coahuila, México.
Disponibile:<http://www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort04/09-Vermicomposta%20potencial%20pa%20desarrollo%20esp%20vegetales.pdf>
Recuperado: 09 de Octubre de 2009
- Moreno-Reséndez, A (2005).Origen, importancia y aplicación de vermicomposta para el desarrollo de especies hortícolas y ornamentales.Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro – UL
Disponibile:<http://www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort05/vermicomposta.pdf>
Recuperado: 20 de Agosto de 2009.

- Muthukumaravel, K., A. Amsath and M. Sukumaran (2008). Vermicomposting of vegetable wastes using cow dung. E-Journal of Chemistry 5 (4): 810 - 813.
- Naddafi, K., M. Zamanzadehh, A. A. Azimi, G. A. Omrani, A. R. Mesdaghinia and 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.
- Nayanan, R. (2001). Report paper – drivers for biodegradable/ compostable plastic and role of composting in waste management and sustainable agriculture. Bioprocessing of Solid waste & Sludge, 1(1): 1- 9.
- Ndegwa, P. M. and S. A. Thompson (2000). Integrating composting and vermicomposting in the treatment of bioconversion of biosolids. Biores Technol, 76: 107-112.
- NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta) - especificaciones y métodos de prueba.
 Disponible:http://www.sagarpa.gob.mx/v1/agricultura/info/comp/it/normas/noti/PROY_NMX_HUMUS_24072007_DGN.pdf
 Recuperado: 10 de Noviembre de 2009
- Oropeza-García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. Caos Conciencia 1: 51-58
- Paniagua-Michel, J. y G. Rodríguez-Quiroz. (2005). El vermicomposteo de biosólidos y agua tratada en el noroeste de México. Ecoparque, un caso de estudio.
 Disponible:<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico2005/paniagua.pdf>
 Recuperado: 04 de Octubre de 2009.
- Parthasarathi, K. (2007). Influence of moisture on the activity of *Perionyx excavatus* (perrier) and microbial–nutrient dynamics of pressmud vermicompost. J. Environ. Health. Sci. Eng., 4(3): 147 - 156.
- Pineda, J. A. (2006). Lombricultura. Instituto hondureño del café (IHCAFE).
 Disponible:
<http://www.fopriderh.org/cms/librosvirtuales/1175041790.pdf>
 Recuperado: 18 de Agosto de 2004.

- Puerta-Echeverri, S. M. (2004). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. *Lasallista de Investigación* 1(1): 56 - 65.
- Quinchía, A. M. y D. M. Carmona (2004). Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. *Revista EIA*, 2: 889 – 108.
- Quintero-Lizaola, R., R. Ferrera-Cerrato., J. D. Etchevers-Barra, N. E. García- Calderón, R. Rodríguez-Valadares-Kabana, G. Alcántar-González y A. Aguilar-Santalises (2003). Enzimas que participan en el proceso de vermicompostaje. *Terra*, 21(1): 73-80.
- Quintero-Lizaola, R., M. L. Andreae C. y V. De Blas E. (2000). Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo. Departamento de Biología vegetal y ciencia del suelo. Facultad de ciencias. Universidad de Vigo, España, 5: 1-10
Disponible: <http://edafologia.ugr.es/Revista/Tomo5/a1t.htm>
Recuperado: 29 de Agosto de 2009.
- Reinés-Alvarez, M. M., C. Rodríguez-Valadares, O. Carrillo Farnes, A. Loza-Llamas y S. Contreras-Ramos-Rodríguez (2005). Nuevos avances en la biotecnología de la Lombricultura. Facultad de Biología, Universidad de La Habana.
Disponible:http://revistas.mes.edu.cu/eduniv/02-Libros-por-ISBN/959-16-0500/0457-Nuevos-Avances-Biotecnologia-de-la-Lombricultura.pdf/at_download/file
Recuperado: 27 de Septiembre de 2009
- Rivas-Lucero, B. A, G. V. Nevárez-Moorillón, R. G. Bautista-Margulis, A. Pérez-Hernández y R. Saucedo-Terán (2003). Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. *Agrociencia*, 37(2): 157 - 166.
- Roca, L. (2003). Perspectiva ambiental: Compostaje. Fundación TERRA, Barcelona.
Disponible: <http://www.ecoterra.org/data/pa29e.pdf>
Recuperado: 06 de Septiembre.

- Rodriguez-Quiroz, G. y J. Paniagua-Michel (2004). El vermicomposteo de biosólidos y agua tratada en el noroeste de México. Ecoparque, un caso de estudio.
Disponible:<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico2005/paniagua.pdf>
Recuperado: 23 de Septiembre de 2009.
- Rodriguez-Valadares, L. (2004). A Vermicompostagem do lodo lagoas de tratamento de efluentes industriais consorciada com composto de lixo urbano. *Enbenharia Sanitária e Ambiental*, 9 (3): 218 - 224.
- Sainz, H., R. Melgar; R. Alvarez, M. Gómez y R. Nogales (2000). Biotransformación y valorización agrícola de subproductos del olivar - orujos secos y extractados- mediante vermicompostaje. *Edafología* 7 (2): 103 - 111.
- Sanchez, J. (s/f). Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas.
Disponible:<http://www.fertitec.com/PDF/FERTILIDAD%20DEL%20SU ELO%20Y%20NUTRICION.pdf>
Recuperado: 23 de Octubre del 2009.
- Santamaría, S., R. Ferrera-Cerrato, J. J. Almaraz-Suárez., A. Galvis-Spínola y I. Barois-Boullard. (2001). Dinamica y relaciones de microorganismos, C - orgánico y N - total durante el composteo y vermicomposteo. *Agrociencia* 35 (4): 337 - 384.
- Sardiñas-Peña, O. y A. Pérez-Cabrera (2004). Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato. *Rev Cubana Hig Epidemiol*, 42(2).
Disponible:
http://www.bvs.sld.cu/revistas/hie/vol42_2_04/hig02204.htm
Recuperado: 12 de Septiembre de 2009.
- Schmidt Jr., R.H. 1989. The arid zones of Mexico: climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert. *J. Arid Environ.* 16: 241-256
- Schuldt, M., A. Rumi., D. E. Gutiérrez G., N. Caloni, J. Bodnar, N. Revora, V. Tasso, M. Valenti, J. Varela y H. De Belaustegui (2005). Culture of *Eisenia fetida* (Annelida, Lumbricidae) on puffed rice scrap in outdoors and laboratory conditions. *Ecología Austral*, 15: 217 - 227.

- Schuldt, M., R. Christiansen, L. A. Scatturice y J. P. Mayo (2007). Lombricultura. Desarrollo y adaptación a diferentes condiciones de temperie (Vermiculture. Development and adaptation to diverse climatic conditions). REDVET. Revista electrónica de Veterinaria, 8 (8): 1 - 10.
- Suthar, S. and S. Singh (2008). Vermicomposting of domestic waste by using two epigeic earthworms (*Perionyx excavatus* and *Perionyx sansibaricus*). Int. J. Environ. Sci. Tech. 5 (1): 99 - 106.
- Suthar, S. (2009). Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash using epigeic *Eisenia fetida* (Oligochaeta). Journal of Hazardous Materials, 163 (1): 199 – 206.
- Toccalino, P. A., M. C. Agüero, C. A. Serebrinsky y J. P. Roux (2004). Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) según estación del año y tipo de alimentación. Revista electrónica de Veterinaria, 15: 65 - 69.
- Toccalino, P. A., P. J. Agüero y M. C. Agüero (2005). Comportamiento reproductivo de *Eisenia foetida* (Lombriz roja de California) durante las cuatro estaciones del año y alimentadas con distintos compostajes. Revista electrónica de Veterinaria.
Disponible: <http://www1.unne.edu.ar/cyt/2001/4-Veterinarias/V-040.pdf>
Recuperado: 12 de Agosto de 2009.
- Torres, P., A. Perez, J. C. Escobar, I. E. Uribe-Montes y R. Imery (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 27(1):267-275.
- Uribe-Montes, H. R., N. Chávez-Sánchez., G. Orozco-Hernández. y M. S. Espino-Valdez (2003). Biosólidos digeridos anaeróbicamente en la producción de maíz forrajero. *Agricultura Técnica en México*, 29 (1): 25 - 34
- Utria, E., I. Reynaldo, A. Cabrera, D. Morales, Ada Morúa y Nereida Álvarez (2006). Caracterización de los biosólidos de aguas residuales de la estación depuradora de aguas residuales “Quibú”. *Cultivos Tropicales*, 27 (3): 83 – 87.

VIII.- ÁPENDICE

	Días	pH	CE mS/cm ⁻¹	CIC meq/100 g	% MO	% C Org.	% NT	C:N
T1	0	6.47	6.85	18	25.48	14.77	3.36	4.39
	30	6.84	11.56	20	28.95	16.79	3.31	5.07
	60	7.63	12.25	21	35.56	20.62	2.61	7.9
	90	7.08	11.89	23	28.63	16.6	1.84	9.02
	120	7.35	10.88	26	24.12	13.99	1.95	7.17
T2	0	7.06	10.54	16	20.29	11.79	1.10	10.71
	30	7.62	12.91	21	22.79	13.21	1.28	10.32
	60	8.2	12.87	22	21.4	12.41	1.16	10.69
	90	7.84	15.77	26	19.07	11.06	0.81	13.65
	120	7.75	16.25	20	18.27	10.59	1.4	7.56
T3	0	7.62	9.25	18	19.3	11.1	1	11.1
	30	8.2	14.16	22	23.87	13.84	0.89	15.55
	60	8.66	13.68	23	30.58	17.73	0.86	20.61
	90	8.14	14.13	23	17.45	10.12	0.64	15.81
	120	8.38	13.7	21	15.22	8.82	0.93	9.48
T4	0	7.79	13.74	20	19.44	11.27	0.99	11.38
	30	8.38	12.42	20	15.55	9.01	0.33	27.3
	60	8.71	12.77	19	18.17	10.53	0.33	31.9
	90	8.23	11.28	15	15.8	9.16	0.33	27.75
	120	8.14	12.35	14	14.98	8.68	0.66	13.42

Conteo final de lombrices <i>Eisenia fetida</i>				
	A	B	C	D
T1	172	120	136	158
T2	114	330	129	215
T3	133	97	177	139
T4	281	131	129	395