



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN ECOTOXICOLÓGICA DE ‘COMPOSTA’  
PRODUCIDA CON RESIDUOS VEGETALES DE HUMEDALES  
ARTIFICIALES Y LODOS PRIMARIOS A ESCALA DE  
LABORATORIO”**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA AMBIENTAL

SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

P R E S E N T A:

**I.C. NADJA AQUARIMANTIMA GAITÁN ZAMORA**

TUTOR:

**DRA. en ING. MARÍA DEL CARMEN DURÁN DE BAZÚA**

2006





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## JURADO ASIGNADO

Presidente: M.I. Ramírez Camperos Esperanza (Facultad de Ingeniería, Campus Morelos)

Vocal: Dr. Morgan Sagastume Juan Manuel (Instituto de Ingeniería, UNAM)

Secretario: Dra. en Ing. Durán Domínguez de Bazúa Ma. del Carmen (Facultad de Química, UNAM)

1<sup>er</sup> Suplente: Dra. Moeller Chávez Gabriela (Facultad de Ingeniería, Campus Morelos)

2<sup>do</sup> Suplente: Dra. Cabirol Nathalie (Instituto de Ingeniería, UNAM)

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio E-301, Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM

Laboratorio B-201, Tecnologías mas limpias, Facultad de Química, UNAM

Instituto de Ingeniería, Campus Morelos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Tutor principal

\_\_\_\_\_  
Dra. en Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

Sustentante

\_\_\_\_\_  
I.C. Nadja Aquarimantima Gaitán Zamora



## Votos aprobatorios



## RECONOCIMIENTOS ACADÉMICOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar mis estudios de maestría.

Al CONACYT por la beca que me otorgó para mi formación académica de posgrado.

Al Programa de Apoyo a Proyectos Institucionales para el Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME), EN103704, Apoyo a la Enseñanza Experimental de los Laboratorios Terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM, por el apoyo económico parcial otorgado para la impresión de este trabajo.

Un reconocimiento sincero a la Dra.-Ing. María del Carmen Durán de Bazúa por el apoyo que me brindó en la realización de este proyecto, por sus enseñanzas y, sobre todo, por su ejemplo. También a los miembros de mi comité tutorial, M. en C. Esperanza Ramírez Camperos y Dr. Juan Manuel Morgan Sagastume, por sus valiosos comentarios académicos que enriquecieron esta investigación a lo largo de los cuatro semestres de mis estudios de posgrado. Le agradezco en especial a la M. en C. Esperanza Ramírez Camperos por su invaluable cooperación académica permitiendo que los estudios ecotoxicológicos se realizaran en las instalaciones del IMTA bajo su supervisión y los consejos brindados para la parte de los estudios ecotoxicológicos y del escalamiento de los reactores para los humedales prototipo de la UNAM.

Al Sistema de Aguas del Distrito Federal y, en particular, a su personal adscrito al Vivero Forestal de Coyoacán, por todo el apoyo otorgado para las actividades de mantenimiento y acondicionamiento del humedal artificial de Viveros de Coyoacán y, sobre todo, por su enorme compromiso y diligencia en la realización de sus actividades de apoyo. Así como también al personal de Viveros de Coyoacán por su apoyo en las actividades de mantenimiento del humedal artificial y, en especial, a la Bióloga Lourdes Hernández por su gran disposición para estas labores.

A la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM, por su cooperación en las labores de mantenimiento del humedal artificial de Zona Cultural de la UNAM, especialmente al IQ Alfredo Martínez Sigüenza, Coordinador de Áreas Verdes, por su amable disposición para la realización de estas actividades, así como también al Biólogo Javier F. Montoya Gómez, Residente Responsable de la Planta de Composta, por su apoyo en la realización de este proyecto.

A la Bióloga Nora Salinas, por su apoyo en el montaje de la técnica y la realización de determinación de huevos de helminto. Al personal del Departamento de Biología de la Facultad de Química de la UNAM, DB-FQ-UNAM, especialmente al QFB Alejandro Camacho por su invaluable apoyo, ya que la determinación de coliformes fecales y huevos de helmintos, así como las pruebas de viabilidad de los huevos, fueron realizadas bajo su supervisión directa. Al maestro Abel Gutiérrez por su valiosa revisión de las fotografías de los huevos de helmintos corroborando la presencia solamente de nemátodos en las observaciones microscópicas. A la maestra Adriana Mejía por su disposición a establecer el contacto con el personal experto en helmintos del DB-FQ-UNAM. También le quiero agradecer al personal de la Facultad de Química, del Conjunto E, por su invaluable apoyo (transportación a los humedales y tareas de mantenimiento), con especial mención para el Sr. Servando Bardales, el Sr. Gerardo Ávila Vargas y el Sr. Juan Francisco Fragoso Anaya.



## DEDICATORIAS

Este trabajo se lo dedico a mis papás por apoyarme siempre en todos los proyectos que he querido realizar y vaya que han sido algunos cuantos, a mi mamá por dedicarme su tiempo, por su comprensión y compartir sus enseñanzas que me han servido en varias ocasiones y a mi papá por ser totalmente mi ejemplo a seguir.

A mi hermano, porque hemos estado juntos compartiendo nuestro tiempo y pensamientos y porque haga lo que haga siempre está ahí para escucharme y darme su apoyo.

A mi abuelita Cristina porque siempre he sentido su cariño y sus buenas vibras.

A mis tíos Paco y Enrique por que gracias a ellos encontré mi vocación de ingeniera civil y a mi tío Manolo también porque han estado cerca de mí, en mi formación y en las decisiones que he tomado.

A mis tías Cristina, Yolanda y Nayeli por darme parte de su sabiduría y porque siempre han sido partícipes de mis ideas.

A mis primos por su cariño y para dejarles un caminito abierto para que sean los mejores profesionistas o investigadores.

A mis amigas Yolanda y Valeria por ser incondicionales siempre y por estar a control remoto cerca de mí en estos dos años.

A mis amigos: Alejandro por ser una persona integra, a Luis porque en la hora del café tratábamos de arreglar el mundo y por ayudarme siempre que necesitaba, a Cuquis por escucharme, a Amalia por siempre darme su opinión objetiva y a Enedino por todos sus consejos.

Y por último a David porque durante estos dos años ha estado cerca de mí, jimboka uératini ambe miti; aspka mentku isĩ jindexapti ka jindeati ma arhúkurhikua sanderu k'éri ukuarhini, jimboka jucha arhukuntaniksĩ kanikua ioniksĩ ambe umukunixaptiksĩ jucha janguaksĩ ka jimboka ambe mentku isĩ jindeatiksĩ jimajku juchiti mintsitarhu.



## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	12
<b>ABSTRACT</b>	13
<b>DEFINICIONES</b>	14
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	16
1.1 Problemática	17
1.2 Objetivo	18
1.3 Metas	18
1.4 Alcances	19
<b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS</b>	20
2.1 Revisión bibliográfica	21
2.2 Parámetros comúnmente usados	22
2.3 Indicadores de contaminación bacteriología y parásitos	28
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA</b>	31
3.1 Acondicionamiento de los reactores	31
3.2 Fuente de lodos primarios	31
3.3 Material foliar y cañas de las hidrofitas	34
3.4 Métodos analíticos	35
3.5 Arranque de los reactores	36
3.6 Alcance de condiciones estables	39
3.7 Pruebas toxicológicas	40
3.8 Análisis estadístico para validar resultados	42
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	44
4.1 Resultados experimentales obtenidos	44
4.1.1 Caracterización de los materiales	44
4.1.2 Evolución del parámetros de medición en las etapas de biorreacción y maduración	45
4.1.3 Comparación de los tratamientos a la entrada y a la salida de la biodegradación ("composta")	56



	4.1.4 Comparación de los parámetros entre los tratamientos de los dos distintos tipos de lodos al inicio y al término de la biodegradación	58
	4.1.5 Realización de pruebas toxicológicas en "composta" terminada	59
	4.2 Estimación de la cantidad de subproductos de los humedales en estudio	70
	4.3 Discusión final	78
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	80
	5.1 Conclusiones	80
	5.2 Recomendaciones	81
<b>ANEXOS</b>		82
<b>1</b>	<b>Metodologías analíticas empleadas (Muestreo, transportación y conservación)</b>	83
	A1. Métodos de muestreo de lodos y biosólidos	83
<b>2</b>	<b>Metodologías analíticas empleadas (Humedad, sólidos totales y volátiles, pH, carbono orgánico total)</b>	87
	A2.1 Determinación del contenido de humedad en sólidos (NMX-AA-016-1984)	87
	A2.2 Sólidos totales y volátiles (APHA-AWWA-WPCF, 1992)	88
	A2.3 Determinación del pH (NMX-AA-25-1984)	89
	A2.4. Obtención de carbono orgánico total (COT)	90
<b>3</b>	<b>Métodos para cuantificación de huevos de helmintos y coliformes fecales en lodos y biosólidos</b>	91
	A3.1 Métodos para cuantificación de huevos de helmintos en lodos y biosólidos	91
	A3.2 Método para la cuantificación de coliformes fecales en lodos y biosólidos	95
<b>4</b>	<b>Mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas prototipo de humedales artificiales de flujo horizontal y vertical (Tomado de la tesis de Rodríguez y Varela, 2003)</b>	99
	A4.1 Zona Cultural de la Ciudad Universitaria	99
	A4.1.1 Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo vertical descendente, (HAFVD)	99
	A4.2. Viveros Forestales de Coyoacán	103





	A4.2.1 Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo horizontal, HAFH	103
<b>5</b>	<b>Datos experimentales</b>	107
<b>6</b>	<b>Análisis estadístico de los datos experimentales</b>	118
	A6.1. Análisis estadístico de los valores obtenidos	118
	A6.2. Comparación de los tratamientos a la entrada y a la salida	125
<b>7</b>	<b>Consideraciones para la construcción de un lecho de secado</b>	130
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	131

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Temperatura y tiempo de exposición necesarios para eliminar patógenos presentes en la materia orgánica de una "composta" (Negro <i>et al.</i> , 2000)	26
Tabla 2.2	Cantidades de huevos de helmintos en biosólidos de aguas residuales y lodos de tratamientos de aguas residuales municipal (Strauss <i>et al.</i> , 2003)	29
Tabla 2.3	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (DOF, 2002)	30
Tabla 3.1	Condiciones de operación y nomenclatura de los reactores	36
Tabla 3.2	Contenido de las macetas para la factibilidad de utilizar "composta" como mejorado de suelos	41
Tabla 3.3	Tratamientos adicionales de "composta" al inicio y término de su proceso de degradación	41
Tabla 4.1	Caracterización de los materiales	44
Tabla 4.2	Relación C/N al inicio, intermedio y final del proceso	49
Tabla 4.3	Porcentajes de disminución de peso y volumen	51
Tabla 4.4	Resultados de las pruebas microbiológicas al final de la biodegradación	55
Tabla 4.5	Estadísticos de prueba y probabilidades	57
Tabla 4.6	Comparación de los parámetros entre los tratamientos de los dos distintos tipos de mezclas a biodegradar (lodos:carrizo) al inicio de la biodegradación	58



Tabla 4.7	Comparación de los parámetros entre los tratamientos de los dos distintos tipos de mezclas lodos:carrizo al término de la biodegradación	58
Tabla 4.8	Masa de subproductos generada, en kg (cada semestre)	71
Tabla A4-1	Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFVD	102
Tabla A4-2	Condiciones de operación del HAFH	103
Tabla A4-3	Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFH	106

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal	16
Figura 2.1	Muestra de una pila de "composta" al inicio de su llenado (Department of Environment, Saidapet, Chennai, 2005)	21
Figura 2.2	Diagrama de flujo del proceso de "composta"	22
Figura 2.3	Comportamiento de la relación C/N respecto al tiempo (Negro <i>et al.</i> , 2000)	23
Figura 2.4	Necesidades de O <sub>2</sub> durante la "composta" (Negro <i>et al.</i> , 2000)	24
Figura 2.5	Gráfica del comportamiento de la temperatura en el proceso de "composta" (Horsley, 2004)	27
Figura 3.1	Reactores de "composta" utilizados	31
Figura 3.1a	Sedimentador de Viveros	32
Figura 3.1b	Humedal artificial de flujo horizontal que recibe aguas del río Magdalena	32
Figura 3.2a	Sedimentador de Zona Cultural	32
Figura 3.2b	Diagrama esquemático del sistema de humedales de flujo vertical localizado en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria	33
Figura 3.2c	Fotografía de los sedimentadores primarios del humedal artificial de flujo vertical localizado en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria	33
Figura 3.3	Río Magdalena desde su nacimiento en Los Dínamos hasta su unión con el río Mixcoac	34
Figura 3.4	Reducción de tamaño del material biológico del corte de carrizos	34
Figura 3.5a	Volumen de 1 kg de hidrofitas	37



Figura 3.5b	Volumen de 1 kg de lodos	37
Figura 3.6	Báscula de 25 kg	39
Figura 3.7	Ubicación de las macetas de maíz y frijol	42
Figura 4.1	Perfiles de temperatura versus tiempo	46
Figura 4.2	Contenido de humedad, %, versus tiempo	48
Figura 4.3	Relación C/N de los reactores de "composta"	50
Figura 4.4	Variación del pH respecto al tiempo	52
Figura 4.5	Comportamiento del pH de los lixiviados	54
Figura 4.6	Macetas sembradas con maíz y frijol con distintos tipos de tratamientos	60
Figura 4.7	Resultado del número de plantas emergentes de maíz en los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural al término de la experimentación	62
Figura 4.8	Resultado del número de plantas emergentes de maíz en los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural al término de la experimentación	62
Figura 4.9	Resultado del número de plantas emergentes de maíz en los tratamientos utilizando lodo (crudo y como "composta") de Viveros de Coyoacán al término de la experimentación	63
Figura 4.10	Resultado del número de plantas emergentes de frijol en los tratamientos utilizando lodos (crudo y como "composta") de Viveros de Coyoacán al término de la experimentación	64
Figura 4.11	Altura del tallo de las plantas de maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Zona Cultural	65
Figura 4.12	Altura del tallo de las plantas de frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Zona Cultural	66
Figura 4.13	Altura del tallo de las plantas de maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Viveros de Coyoacán	66
Figura 4.14	Altura del tallo de las plantas de frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Viveros de Coyoacán	67
Figura 4.15	Longitud de la raíz de las plantas del maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural	68
Figura 4.16	Longitud de la raíz de las plantas del frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural	69
Figura 4.17	Longitud de la raíz de las plantas del maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Viveros de	69



---

Coyoacán		
Figura 4.18	Longitud de la raíz de las plantas del frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Viveros de Coyoacán	70
Figura 4.19	Dimensiones de una pila de "composta" cuadrada	73
Figura 4.20	Dimensiones de una pila de "composta" cilíndrica	76
Figura 4.21	Ubicación de la pila de "composta" en el humedal artificial de flujo horizontal (Viveros de Coyoacán)	77
Figura 4.22	Ubicación de la pila de "composta" en el humedal artificial de flujo vertical (Zona Cultural, UNAM)	78
Figura A1.1	Tambo receptor de 20 L	86
Figura A4.1	Detalles de los perfiles en el HAFVD (Fenoglio Limón 2000)	99
Figura A4.2	Paredes de concreto del HAFVD	100
Figura A4.3	Paredes cubiertas con la geomembrana	100
Figura A4.4	Sedimentador primario del HAFVD (fosa séptica)	100
Figura A4.5	Tanque homogenizador o segundo sedimentador del HAFVD	100
Figura A4.6	Esquematación de la salida del HAFVD	101
Figura A4.7	Vista desde arriba de la cisterna de salida del humedal de Viveros de Coyoacán	104
Figura A4.8	Detalle lateral de la obra civil para el humedal artificial de flujo horizontal (Ramírez-Carrillo, 1998)	105
Figura A4.9	Vista general de la poda parcial en el humedal	105
Figura A4.10	Labores de purga de lodos en el sedimentador y su extracción para experimentación	105
Figura A7-1	Corte transversal de un lecho de secado de lodos	130



## RESUMEN

La importancia que han tomado actualmente los humedales artificiales es porque tratan aguas residuales municipales, industriales, agrícolas o mineras, de una manera más cercana a la natural puesto que se trabaja con plantas o hidrofitas-microorganismos-soporte inerte, transformando los compuestos presentes en el agua contaminada y posteriormente estabilizándolos. Uno de los problemas que se generan en todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales es el de la acumulación de lodos en el sedimentador primario. Estos lodos representan un riesgo por su composición química y microbiológica. Por eso, se requiere estabilizarlos para que no dañen el entorno y poder darles una disposición final adecuada que puede ser, en el mejor de los casos, un uso agrícola. Para lograr este fin, en esta investigación se hicieron pruebas de biodegradación de estos residuos de dos humedales artificiales a escala piloto en reactores de laboratorio siguiendo el método conocido como "composta" empleando, además, los residuos foliares y de las cañas de las hidrofitas como material abultante. Se utilizaron 8 reactores de 0.019 m<sup>3</sup> cada uno con diferentes relaciones lodos:biomasa, 1:1 y 1:2, así como sus respectivas repeticiones. El tiempo de reacción fue de 12 semanas y 10 semanas de maduración. Al terminar este periodo se llevaron a cabo pruebas toxicológicas empleando semillas de maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*) utilizando el producto biodegradado en un sustrato puro compuesto de 150 g de tierra negra comercial –tierra de hoja- y 150 g de arena de mar lavada de grano fino de 0.25-0.30 mm. Los parámetros de evaluación fueron el número de plántulas emergentes (PE), la longitud del tallo (LT) y la longitud de la raíz (LR) después de un periodo de 28 días. Los resultados indicaron que el mejor tratamiento para el crecimiento global de las plantas de ambas semillas fue el que se constituyó de sustrato puro + "composta", con lo que se pudo concluir que la "composta" de lodos primarios más residuos foliares y de las cañas de las hidrofitas de los humedales artificiales, es un adecuado mejorador de suelos y una opción viable para la estabilización y posterior utilización de los lodos residuales.

Palabras clave: Humedales artificiales, lodos, biodegradación, pruebas ecotoxicológicas, semillas de frijol, semillas de maíz.



## ABSTRACT

Artificial wetlands have become important wastewater treatment systems because they are applicable not only for municipal effluents but for those from the industrial, agricultural or mining installations. Besides, their use of plants or hydrophytes-microorganisms-inert support makes them work nearer to Nature, transforming the compounds present in the polluted wastewaters, and stabilizing them. One of the problems confronted by all wastewater treatment systems is the accumulation of watery sludges in the sedimentary tanks (primary settlers). These sludges represent a risk due to its chemical and microbiological composition. Therefore, they must be stabilized to avoid hazards and disposed adequately, being its agricultural use a good approach. To reach this goal, in this research were carried out experiments to biodegrade these residues coming from two prototype plant artificial wetlands using laboratory scale reactors. The method followed is the one known as "composta" using the foliar and cane residues from the hydrophytes as bulk material. Eight reactors, 0.019 m<sup>3</sup> each with two different ratios sludges:plants biomass, 1:1 and 1:2, as well as its replicas. Reaction time was 12 weeks and 10 additional weeks for maturation of the biodegradation processes products. With these matured products ecotoxicological experiments were performed employing maize (*Zea mays*) and beans (*Phaseolus vulgaris*) seeds using the biodegraded products in mixtures with a pure substrate made of 150 g commercial black earth –known as "humus" earth- and 150 g washed fine grain sea sand, 0.25-0.30 mm grain average size. Evaluation parameters were the number of emerging plants (PE), its stem length (LT), and the root length (LR), after a period of 28 days. Results indicate that the best treatment for the overall plants development from both seeds was the one with pure substrate + "composta", concluding that "composta" from primary sludge mixed with foliar and cane residues from the hydrophytes is an adequate soil improver, and a viable option for the remediation of artificial wetlands residual primary sludge.

Key Words: Artificial wetlands, sludges, biodegradation, ecotoxicological tests, bean seeds, maize seeds.



## DEFINICIONES

**Biosólidos:** Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento (DOF, 2002).

**"Composta":** Palabra que no existe en el diccionario de la Real Academia Española, RAE, pero que proviene del latín *compositum*, compuesto o mezcla. Se usa para designar las mezclas de residuos biodegradables que reducen su volumen y mejoran las características de los compuestos originalmente mezclados, especialmente en su uso como fertilizadores o "mejoradores" de suelos. Recientemente se aceptó la palabra *compost* en el diccionario pero, no solamente es difícil de pronunciar, sino que no parece respetar el origen latino de la palabra. En este documento se usará la palabra "composta" (entrecomillada ya que no existe oficialmente en español). Tomado del Glosario del libro "Introducción a la Química Ambiental" (Manahan, 2007, en prensa).

**Curado o maduración:** Es la conversión del componente biodegradable a una sustancia similar al humus. El tiempo de maduración o curado es de 30 días o más (Castillo *et al.*, 2000).

**Ecotoxicología:** Se encarga del estudio de las relaciones indirectas entre las causas, los impactos sobre los individuos, los efectos y finalmente las alteraciones sobre las poblaciones y las comunidades (Instituto Nacional de Ecología, 2005). Para esta investigación se estudia el impacto de los lodos primarios, estabilizados y sin estabilizar, en el desarrollo de plantas desde su emergencia hasta su crecimiento como posibles mejoradores de suelo.

**Estabilización:** Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente (DOF, 2002).

**Huevos de helmintos viables:** Huevos de helmintos susceptibles de desarrollarse e infectar (DOF, 2002).

**Lixiviado:** Líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos o en suspensión (DOF, 2002).

**Lodos:** Son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de



las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización (DOF, 2002).

**Mejoramiento de suelos:** Es la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas para usos agrícolas (DOF, 2002).

**Mezclado:** Este término, aplicado al proceso de biodegradación conocido como "composta", implica que los lodos se mezclen con un material de soporte que actúa como agente abultante, el cual aumenta la porosidad y permite la aireación de la mezcla; aportando, además, nutrientes para la actividad microbiana y disminuyendo el contenido de humedad.

**Sistema "WSP":** (WSP: Waste stabilisation ponds), sistemas de estanques de estabilización de residuos (Strauss *et al.*, 2003).



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Los humedales son sistemas creados artificialmente para tratar aguas residuales ya sean municipales, industriales, agrícolas o mineras, de una manera natural puesto que se trabaja con plantas hidrofitas-microorganismos-soporte inerte, que transforman los compuestos presentes en el agua y los estabilizan (Esponda-Aguilar, 2001).

Con los humedales artificiales se obtiene una buena eficiencia de remoción de contaminantes y esto los hace ser una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales con una inversión moderada para su instalación, así como costos de operación y mantenimiento muy bajos. En las instalaciones de humedales artificiales (Figura 1.1) se tiene en el inicio un sedimentador primario al cual llega el agua residual sin ningún tratamiento previo o con una etapa de separación con rejillas para retener sólidos grandes. Del sedimentador pasa al reactor bioquímico que es prácticamente el humedal artificial y al final, de éste se capta el agua tratada para su disposición final.

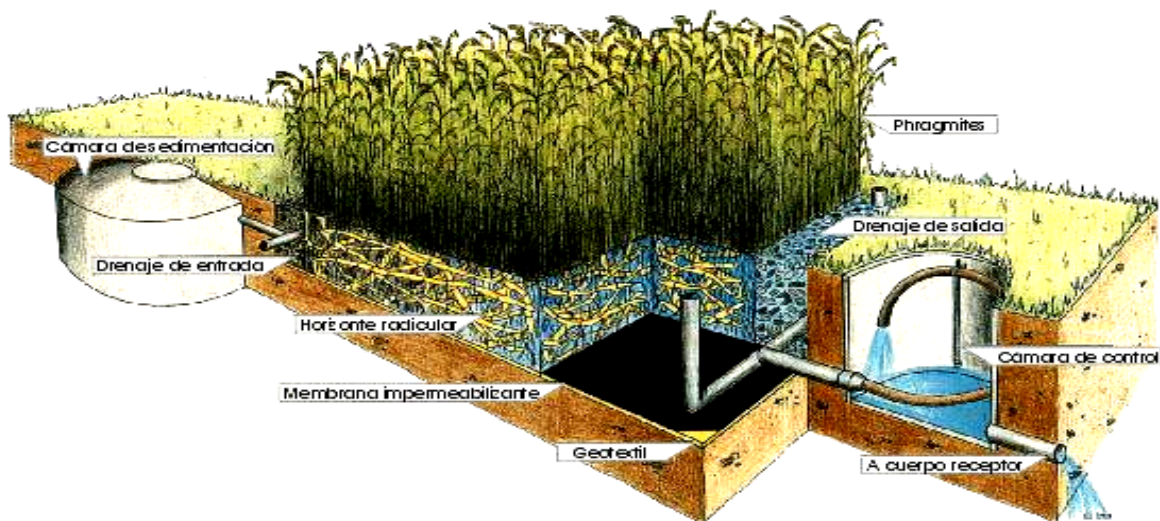


Figura 1.1 Esquema de un humedal artificial de flujo horizontal

Los humedales artificiales tienen como subproducto sólidos acumulados en el sedimentador primario que requieren ser retirados para evitar que se obstruyan las tuberías (Rodríguez y Varela, 2003). Éstos contribuyen de manera importante a la



contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen (DOF, 2002). Para su tratamiento se emplean sistemas anaerobios-aerobios, conocidos como reactores de "composta" o compost, término que fue recientemente aprobado por la Real Academia Española, derivado del latín *compositum*, que significa mezcla de sustancias de origen orgánico que sirven para fertilizar o renovar la tierra. El producto resultante tiene un volumen menor y los compuestos o elementos presentes en ellos se estabilizan desde el punto de vista químico (Íñiguez y Vaca, 2001). Este reactor de "composta" consiste en un proceso biológico que aprovecha los microorganismos presentes en el mismo material que se va a procesar para convertir el material orgánico biodegradable en un producto humificado útil para la agricultura (Georgacakis *et al.*, 1996; Lau *et al.*, 1992, Liao *et al.*, 1993; Sims, 1994). Se emplean materiales que permiten la entrada de oxígeno para las etapas aerobias, conocido como agente abultante. Generalmente se utiliza hojarasca; sin embargo, el material a utilizar depende del área geográfica, tipo de cultivo y estaciones del año. En este caso, se usarán los recortes de las hidrofitas. Éstas dentro del humedal artificial van aumentando su altura conforme transforman el CO<sub>2</sub> en biomasa foliar y en las cañas, alcanzando entre 3 y 4 metros de altura en un lapso de 6 meses, por lo que deben ser cortadas semestralmente para mejorar la fotosíntesis (Esponda-Aguilar, 2001). Esta biomasa foliar y de cañas es la que se empleará como el material que aumente la porosidad en la "composta" y que se conoce como material "abultante" (Genevini *et al.*, 1996).

## 1.1 Problemática

Debido a la importancia de que las aguas residuales, especialmente las de zonas rurales y suburbanas, tengan un tratamiento adecuado y un menor costo en el mismo, los humedales artificiales cumplen con los requerimientos necesarios para tratarlas. Uno de los residuos generados durante este tratamiento son los sólidos acumulados dentro del sedimentador primario, a los cuales se les denomina lodos primarios y a los que, generalmente, no se les da algún tratamiento de estabilización específico. Estos residuos representan un problema, ya que son considerados en las legislaciones a nivel internacional como residuos peligrosos, pues contienen desde organismos patógenos hasta sustancias tóxicas (Manahan, 2000). Por esto es que se requiere realizar una etapa



de estabilización antes de disponer de ellos. Un planteamiento puede ser su biodegradación, especialmente cuando no contienen sustancias xenobióticas.

La biodegradación propuesta se basa en el proceso conocido como formación de "composta". En este proceso es importante conocer su eficiencia de estabilización y remoción de contaminantes con base en la presencia de algunos parámetros que se usan como indicadores.

## **1.2 Objetivo**

El objetivo de esta investigación es evaluar la estabilización de residuos primarios de dos humedales artificiales con material abultante, constituido por recortes de hidrofitas en reactores de "composta" con aeración intermitente, a escala de laboratorio, por medio de estudios toxicológicos empleando semillas de plantas comestibles (maíz y frijol).

## **1.3 Metas**

Observar la capacidad de degradación de dos diferentes relaciones lodo:material abultante, usando lodos primarios de dos sistemas de humedales artificiales, uno que recibe aguas residuales mixtas y otro que recibe únicamente aguas residuales sanitarias, evaluando los sistemas durante un periodo de 22 semanas, lapso recomendado por la literatura (Íñiguez y Vaca, 2001).

Realizar un seguimiento analítico continuo de la estabilización de la materia orgánica presente en la mezcla (C, N, pH de lixiviado y "composta", temperatura)

Realizar al inicio y término de los experimentos un seguimiento analítico de los indicadores de contaminación microbiológica, coliformes fecales y huevos de helmintos, para determinar si los lodos y biosólidos cumplen con los límites máximos permisibles de estos parámetros que están establecidos en la Norma Oficial Mexicana 004 (DOF, 2002).

Evaluar la posible toxicidad del producto final mediante el cultivo de semillas de maíz y frijol, usando suelo no contaminado como control y evaluando los tiempos de germinación y el crecimiento de las plántulas.



Plantear una propuesta de escalamiento del sistema de laboratorio para su uso en las zonas rurales tomando como ejemplo las dos plantas prototipo de humedales artificiales de la UNAM, de donde se tomaron los lodos primarios.

#### **1.4 Alcances**

Se considera que la metodología de estabilización a escala de laboratorio de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales en sistemas de humedales artificiales pudiera ser aplicable a las zonas rurales y suburbanas de México que planteen la instalación de sistemas de humedales artificiales para manejar y estabilizar sus residuos produciendo "composta" en el mismo sitio del humedal. No se corroboran los resultados obtenidos a nivel de banco o prototipo.



## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este proyecto de investigación se evaluará la degradación de lodos primarios de dos sistemas de humedales artificiales a escala prototipo, para proponer una metodología de estabilización adecuada, mediante un proceso de producción de "composta". La Figura 2.1 muestra una pila experimental de "composta" al inicio de su llenado.

La "composta" es una sustancia orgánica de color negro, con un pH neutro o poco alcalino y bioquímicamente estable, que se obtiene de la biodegradación de residuos orgánicos, mediante procesos aerobios o anaerobios. Se utiliza como mejorador de suelos, en jardinería y en la regeneración de áreas deforestadas (Larousse, 2002).

La "composta" se conforma principalmente de residuos orgánicos que pueden ser lodos primarios a los que se le agrega un agente abultante para incrementar la porosidad y así permitir la entrada de oxígeno para los organismos aerobios y también para absorber la humedad de los lodos. Para este caso, se utilizaron como agentes abultantes los recortes de las hidrofitas. En ocasiones se le puede agregar un agente acondicionador que permita tener otra fuente de materia orgánica fácilmente degradable y así acelerar el proceso de "composta" (Cogger y Sullivan, 2001).

Para este caso de estudio, el proceso de producción de "composta" se puede utilizar para reducir el efecto nocivo de los lodos primarios ya que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen. En la Norma Oficial Mexicana 004 (DOF, 2002), se establecen las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final, proteger al medio ambiente y en consecuencia a la salud humana.

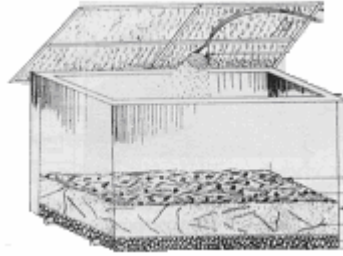


Figura 2.1 Muestra de una pila de "composta" al inicio de su llenado (Department of Environment, Saidapet, Chennai, 2005)

## 2.1 Revisión bibliográfica

La formación de *compost*, palabra recientemente aprobada por la Real Academia Española, RAE, para la acepción que se le da en esta investigación, es la transformación de la materia orgánica a través de su descomposición en un material con características similares al suelo, llamado en la jerga sanitaria "composta". Como esta palabra no existe formalmente, de acuerdo con la RAE, se entrecomillará en todo este texto. Los invertebrados, como insectos y gusanos y los microorganismos, como bacterias y hongos, ayudan en la transformación del material orgánico de la "composta". Este tipo de biodegradación es una forma natural de reciclaje, el cual frecuentemente ocurre en la naturaleza (Maynard, 2000).

La descomposición de la materia ocurre naturalmente en cualquier parte que crecen plantas. Cuando una planta muere o los árboles tiran sus hojas, sus residuos son atacados por microorganismos e invertebrados en el suelo y estos los descomponen en humus. Ésta es la manera en que se recicla un ecosistema. Esta degradación natural puede ser empleada creando condiciones ideales. Los microorganismos e invertebrados requieren fundamentalmente, en el proceso de "composta", de oxígeno y agua. Los productos finales del proceso son una "composta" que sirve como enriquecedor de suelo, dióxido de carbono, agua y calor (Maynard, 2000).

El proceso de formación de "composta" consta de tres etapas (Castillo *et al.*, 2000):

**Mezclado:** Los lodos se mezclan con un material de soporte que actúa como agente abultante, el cual aumenta la porosidad y permite la aireación de la mezcla; además, aporta nutrientes para la actividad microbiana y disminuye el contenido de humedad.



**"Composta"**: Es un proceso biológico aerobio que degrada la materia orgánica, generando dióxido de carbono, vapor de agua y calor. La temperatura de la mezcla puede exceder los 70°C, pero su rango óptimo es entre 50° y 60°C; luego decrece gradualmente por la disminución de nutrientes y la actividad microbiana. Para controlar la temperatura, mantener la humedad o tasa de secado y el suministro de oxígeno, la pila de "composta" debe ser periódicamente sometida a un procedimiento de volteo o aireación. El pH se mantiene dentro del intervalo de 5 a 8 unidades. Se entiende que la etapa de "composta" termina cuando la temperatura interna de la pila iguala a la temperatura ambiente, lo que generalmente ocurre después de 20 a 30 días.

**Curado o maduración**: Es la conversión del componente biodegradable a una sustancia similar al humus. El tiempo de maduración o curado es de 30 días o más.

#### Diagrama de flujo del proceso de "composta"

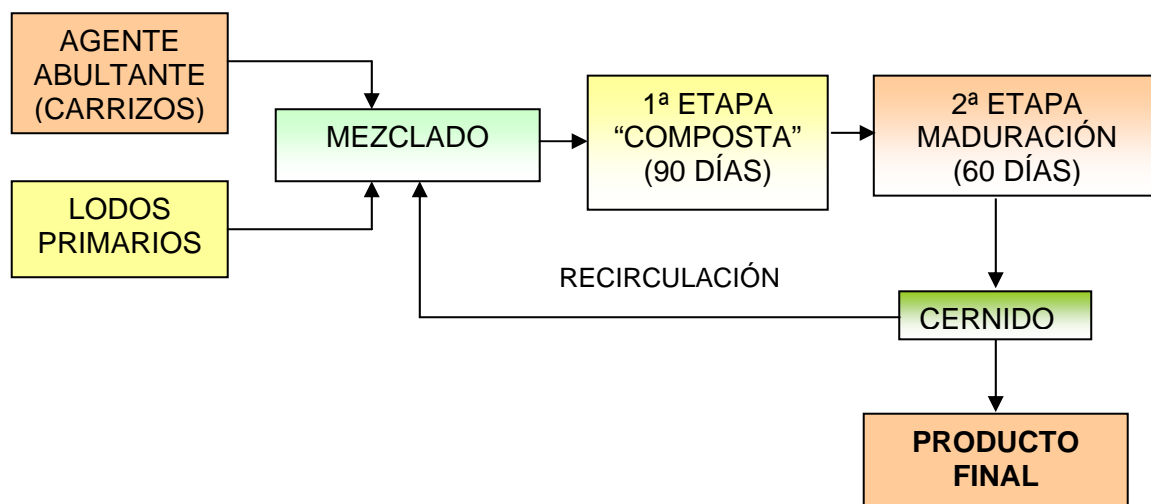


Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de "composta"

#### 2.2 Parámetros comúnmente usados para el control del proceso de "composta"

Para comprobar la madurez de la "composta" se necesita evaluar lo siguiente:

##### Relación Carbono-Nitrógeno (Hadi Bux Leghari, 2000)



El carbono y el nitrógeno son dos elementos fundamentales en la "composta" y la relación entre ellos es muy importante. Las bacterias y hongos en la "composta" digieren y/u oxidan el carbono como fuente de energía e ingieren nitrógeno para sintetizar proteína.

La materia orgánica debe contener carbono con la cantidad suficiente de nitrógeno para que el proceso de descomposición se lleve a cabo. La relación debe ser de 15 a 30 partes de carbono por 1 parte de nitrógeno (30:1) para la mayor parte de los organismos que proliferan en el suelo (Figura 2.3).

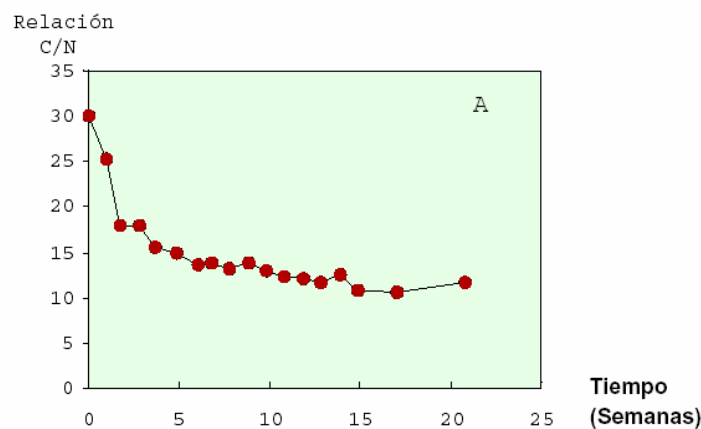


Figura 2.3 Comportamiento de la relación C/N respecto al tiempo (Negro *et al.*, 2000)

Si no hay suficiente nitrógeno el proceso de descomposición es más lento y si hubiera demasiado nitrógeno, puede causar la generación del gas amonio y, en consecuencia, olores desagradables y puede inhibir la proliferación de organismos degradadores.

### Aireación

Cuando está ocurriendo la degradación en la "composta" se toma todo el oxígeno disponible. La aireación es la reoxigenación al centro de la "composta", en donde éste se está acabando. Una descomposición eficiente puede ocurrir solamente si hay suficiente oxígeno para lograrlo, a esto se le llama degradación aerobia. Ésta se logra por la presencia del aire o por la introducción de aire a la "composta" mediante mezclado o aireación artificial (Maynard, 2000).





La aireación debe mantenerse en niveles adecuados teniendo en cuenta además que las necesidades de oxígeno varían a lo largo del proceso, siendo bajas en la fase mesófila, alcanzando el máximo en la fase termófila y disminuyendo nuevamente al final del proceso (Figura 2.4) (Negro *et al.*, 2000).

La aeración se puede hacer mediante un bioldo o "tenedor" de jardín. Si la "composta" no se oxigena puede causar olores desagradables por la descomposición anaerobia.

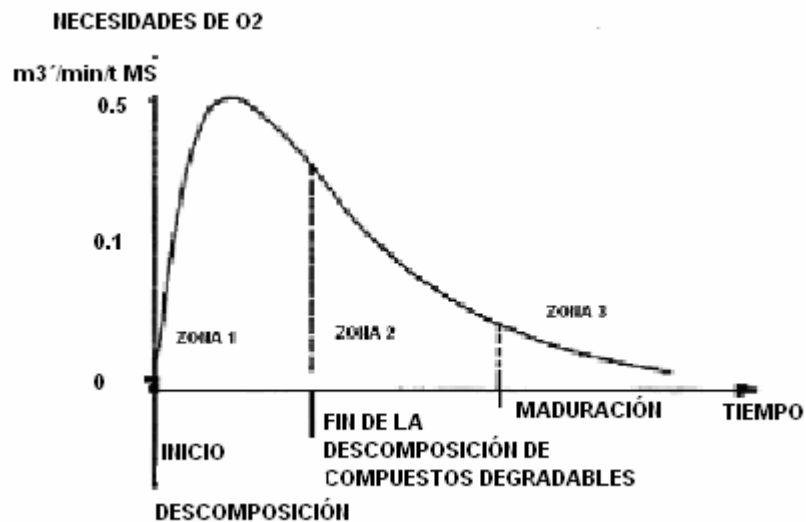


Figura 2.4 Necesidades de O<sub>2</sub> durante la "composta" (Negro *et al.*, 2000)

### Contenido de humedad

Los microorganismos solamente pueden usar moléculas orgánicas que están disueltas en el agua, por lo que la "composta" debe tener un contenido de humedad de entre 40 y 60%. Si el contenido de humedad está por abajo del 40% la actividad microbiana será más lenta. Esto puede llevar a tener una "composta" que no esté completamente estabilizada o que, al haber estado almacenado por periodos excesivamente largos, se haya ocasionado la pérdida de humedad, además que se vuelve polvorienta y difícil de manejar. Si la humedad está arriba de 60%, la degradación se vuelve limitante en oxígeno ya que parte de los espacios intersticiales se llenan de agua en vez de aire y pueden



darse condiciones que promuevan la descomposición anaerobia, más lenta (Maynard, 2000; Negro *et al.*, 2000).

## Temperatura

Los microorganismos generan calor cuando descomponen la materia orgánica (reacciones exotérmicas de oxidación). Una "composta" que alcanza temperaturas entre 40 y 60°C es eficiente. Temperaturas más altas de 60°C inhiben la actividad de la mayoría de los organismos activos de la "composta", especialmente los aerobios. Debido a que se requieren estas temperaturas para que la "composta" se establezca rápido, el proceso se ve disminuido durante los meses fríos de invierno; sin embargo, algunos microorganismos pueden sobrevivir a bajas temperaturas pero su metabolismo es más lento (Maynard, 2000).

Las tres etapas que se ocurren en la producción de "composta" son:

**Mesófila:** la temperatura de la "composta" aumenta desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 40°C, teniendo presencia de hongos.

**Termófila:** Se alcanzan temperaturas de entre 40 y 70°C y los microorganismos presentes son reemplazados por las bacterias termófilas, actinomicetos y hongos termófilos. En esta fase es donde ocurre la máxima degradación y estabilización del material orgánico.

La destrucción de patógenos durante la fase termófila permite la utilización no contaminante de la "composta" como abono orgánico. En la Tabla 2.1 se tiene la temperatura y tiempo necesario para la destrucción de algunos de los patógenos y parásitos más comunes que pueden estar presentes en el residuo a biodegradar (Golueke, 1972).

**Enfriamiento:** es la fase en donde se alcanza la temperatura ambiente, existe una reducción en la actividad microbiana y el reemplazo de los organismos termófilos por bacterias y hongos mesófilos. En la Figura 2.5 se observa el comportamiento ideal en el proceso de "composta", donde se ven las fases mesófila, termófila y, por último, la de enfriamiento.



Tabla 2.1 Temperatura y tiempo de exposición necesarios para eliminar patógenos presentes en la materia orgánica en una "composta" (Negro *et al.*, 2000)

ORGANISMO	TEMPERATURA Y TIEMPO DE EXPOSICIÓN
<i>Salmonella typhosa</i>	Se elimina rápidamente en el montón de la "composta". Son suficientes 30 min a 55-60°C para su eliminación. No se desarrolla a temperaturas superiores a 46°C
<i>Salmonella sp.</i>	Se destruye al exponerse 1 hora a 55°C o 15-20 minutos a 60°C
<i>Shigella sp.</i>	Se destruye al exponerse 1 hora a 55°C
<i>Escherichia coli</i>	La mayoría mueren con una exposición de 1 hora a 55°C o 15-20 min. a 60°C
<i>Taenia saginata</i>	Se elimina en unos pocos minutos a 55°C
Larvas de <i>Trichinella spiralis</i>	Mueren rápidamente a 55°C e instantáneamente a 60°C
<i>Brucella abortus</i>	Se elimina con exposiciones a 62-63°C durante 3 min o a 55°C durante 1 hora
<i>Micrococcus pyogenes</i> var. Aureus	Muere después de 10 minutos de exposición a 50°C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Muere después de 10 minutos a 54°C
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> var. hominis	Muere después de 15-20 min a 66°C o instantáneamente a 67°C
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Se elimina por exposición durante 45 min a 55°C
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i> (nematodos)	Mueren en menos de 1 hora a temperaturas superiores a 55°C

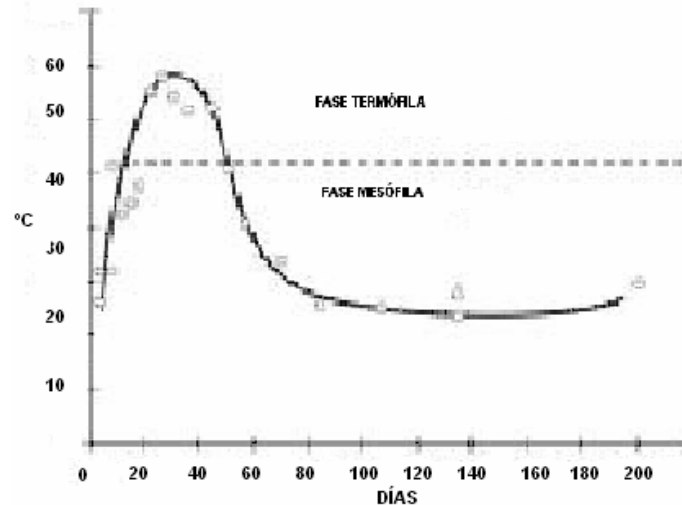


Figura 2.5 Gráfica del comportamiento de la temperatura en el proceso de "composta" (Horsley, 2004)

## Nitrógeno

Es un macronutriente y puede ser el elemento más importante requerido para el crecimiento de las plantas. El nitrógeno es una parte esencial de las proteínas de las células de plantas y animales. Está disponible para las plantas en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). La nitrificación es la oxidación biológica del amoníaco a nitratos, se lleva a cabo en dos etapas acompañadas por dos grupos de bacterias que usan como fuente de carbono el dióxido de carbono y su energía de la oxidación de compuesto inorgánicos (como el amoníaco y los nitritos). Las bacterias *Nitrosomonas* oxidan el nitrógeno de amoníaco a nitrito y las *Nitrobacter* de nitrito a nitrato (Rodríguez-Monroy, 2004). La nitrificación es muy importante ya que los nitratos sirven de abono y el amonio puede resultar tóxico para la flora y fauna.

## Valor de pH

Influye en muchos aspectos a la "composta", incluyendo la disponibilidad de nutrientes y sustancias tóxicas para los microorganismos y la actividad y naturaleza de poblaciones microbianas. El pH óptimo está entre 6 y 7.5, casi neutro, para la mayoría de las bacterias, mientras que para las actividades de hongos y actinomicetos está ente 5.5 y 8.0. El pH es un indicador de la calidad de la "composta" y una herramienta para



determinar su aplicación. Un pH bajo, como de 3.0, indica que la "composta" es anaerobia y la presencia del ión  $H^+$ , puede hacer biodisponibles a elementos potencialmente tóxicos como aluminio y manganeso.

### **2.3 Indicadores de contaminación bacteriología y parásitos**

Una de las características de los lodos primarios es que contienen microorganismos patógenos los cuales causan diversas enfermedades. Una de las razones principales de la realización de "composta" es la eliminación de éstos, en una fase termófila. Es por eso que en México se creó la Norma Oficial Mexicana 004 (DOF, 2002), donde se indica cuáles son los parámetros microbiológicos más importantes a identificar en lodos y biosólidos y cuáles son los límites máximos permisibles para su uso. Los indicadores de contaminación bacteriológica se identifican según la norma oficial con la presencia de coniformes fecales, los patógenos con la *Salmonella spp* y los parásitos con los huevos de helmintos.

Para efectos de esta investigación se realizó la cuantificación de huevos de helmintos y coliformes fecales para corroborar su persistencia después del tratamiento y así identificar su posible disposición. Aunque *Salmonella spp* también aparece en la norma de referencia, en esta investigación no se realizarán análisis para confirmar su presencia o ausencia.

Como se mencionó anteriormente la presencia de parásitos se hace mediante la cuantificación de huevos de helminto, los cuales se refieren a un amplio grupo de nemátodos, céstodos y tremátodos, parásitos de humanos, animales y vegetales, de vida libre, con formas y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados y sus ciclos vitales comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no (DOF, 2002). En esta Norma no se hace referencia a la identificación específica de los huevos presentes (de nemátodos, de céstodos o de tremátodos) y las pruebas de viabilidad que se recomiendan en la literatura internacional tampoco hace referencia a los productos (larvas, embriones, miracidios). En varias citas bibliográficas internacionales se menciona que los nemátodos son los que se encuentran en la mayoría de los casos de las plantas de tratamiento a nivel mundial y para países tropicales (Horak, 1992; Pawlowski y Schultzberg, 1986; Strauss *et al.*, 2003). La Tabla 2.2 muestra un estudio comparativo presentado en la última referencia citada.



Los coliformes fecales son indicadores de la presencia de bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos. Son bacilos cortos, Gram negativos, no esporulados, también conocidos como coliformes termotolerantes. Pueden identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44°C-45°C. Tienen la capacidad de biodegradar la lactosa a temperatura de 44.5°C. Incluyen al género *Escherichia* y algunas especies de *Klebsiella*. Los límites máximos permisibles en los lodos y biosólidos se establecen en la Tabla 2.3 según la norma oficial ya mencionada (DOF, 2002).

Tabla 2.2 Cantidades de huevos de helmintos en biosólidos de aguas residuales y lodos de tratamientos de aguas residuales municipal (Strauss *et al.*, 2003)

Lugar	Número de HH/ L		Huevos de helmintos en biosólidos		Referencia
	Lodo residual	Agua residual	Núm. de HH/g ST	Viabilidad	
Extrabes, Campina Grande (Brazil); sistema "WSP" experimental	-	1000 nemátodos	1,400 – 40,000 (en sólidos sedimentables acumulados en tratamiento primario)	2 – 8% (periodo de almacenamiento de biosólidos, no reportado, probablemente algunos años)	Stott <i>et al.</i> (1994)
Chiclayo (Perú); sistemas "WSP"	-	10 – 40 (mayoría nemátodos)	60 – 260 (en lodos de tratamiento primario)	1 – 5% (Almacenaje de biosólidos 4-5 años)	Klingel (2001)
Asian Institute of Techn.(Bangkok) Humedal artificial a escala piloto (lodos en lechos de secado), para residuos desaguados de fosas sépticas ("dewatered septage") +estabilización	600 – 6,000 ("septage"; nemátodos)	No disponible	170 (promedio de niveles de nemátodos en biosólidos secos acumulados por 3.5 años en lechos de secado de lodos)	0.2 – 3.1%	Koottatep y Surinkul (2000); Schwartzbrod (2000)
Kumasi Ghana; lodo fecal de retretes móviles o temporales ("faecal sludge from unsewered public toilets") y de fosas sépticas	900 – 6,900 (7 muestras) (Ascaris + Trichuris)	No disponible	20 – 85 (3 muestras) (en biosólidos secados en lechos durante 1 – 3 semanas; ST = 20%)	45 – 82% (8 muestras) (biosólidos secados por 1-3 semanas y lodo fresco)	Gallizzi (2003)



Tabla 2.3 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos según la Norma Oficial Mexicana 004 (DOF, 2002)

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN*	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos HH/g en base seca
A (Usos urbanos con contacto directo al público)	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B (Usos urbanos sin contacto directo al público)	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10(a)
C (Usos forestales y agrícolas)	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35(a)

(a) Huevos de helmintos viables

\*NMP número más probable



## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

### 3.1 Acondicionamiento de los reactores

Para montar los experimentos se seleccionaron:

- Ocho reactores (recipientes de plástico), de 36 cm de altura y 28.5 cm de diámetro (volumen total =  $0.023\text{m}^3$  y volumen útil =  $0.0191\text{ m}^3$ ), con una pendiente mínima ( $3^\circ$ ) acoplada con una tabla de madera y una tubería de salida para recolectar los lixiviados (Figura 3.1).



Figura 3.1 Reactores de "composta" utilizados

### 3.2 Fuente de lodos primarios

Los sistemas en estudio son dos humedales artificiales a escala prototipo que posee la Facultad de Química de la UNAM. Uno de ellos se encuentra ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán y recibe las aguas residuales mixtas del río Magdalena, convertido en un enorme "albañal" (Figura 3.3). La planta consta de un sedimentador primario del cual se extraen los lodos cada seis meses (Figura 3.1a, 3.1b). Estos lodos no son como los que tradicionalmente se obtendrían en una planta de tratamiento de aguas residuales ya que la toma de agua residual del río en esta zona se formó con una "costalera" que represa el agua del río y hay una "sedimentación" previa *in situ* en el lecho del río. El otro se encuentra en la Zona Cultural de la UNAM y recibe las aguas residuales de la zona de oficinas administrativas de varios de los edificios aledaños. Son aguas de tipo sanitario que antes de llegar al sistema de humedales artificiales pasan por dos sedimentadores





primarios. El primero es una fosa séptica y el segundo es un pequeño tanque que elimina el resto del material suspendido que no sedimentó en la fosa séptica. Los lodos que se usaron son los del pequeño tanque que recolecta el material que no sedimentó en la fosa séptica y su concentración es mucho menor que la de un sistema primario "tradicional" de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se extraen una vez por año (Figura 3.2a, 3.2b, 3.2c). La toma de las muestras y las labores de mantenimiento preventivo y correctivo siguieron los protocolos establecidos en los laboratorios del PIQAYQA (Anexos 1 y 4) (Rodríguez y Varela, 2003).



Figura 3.1a Sedimentador de Viveros



Figura 3.2a Sedimentador de Zona Cultural

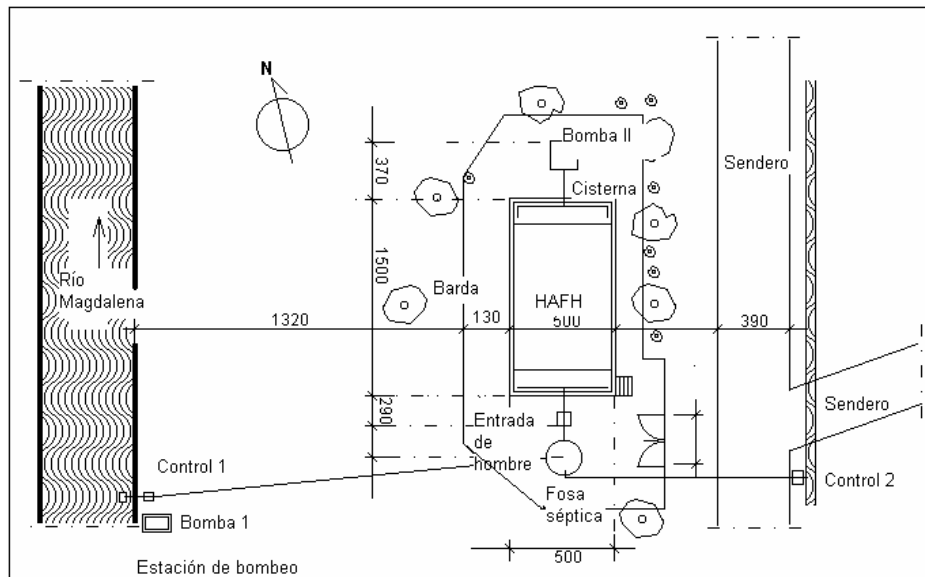


Figura 3.1b Humedal artificial de flujo horizontal que recibe aguas del río Magdalena

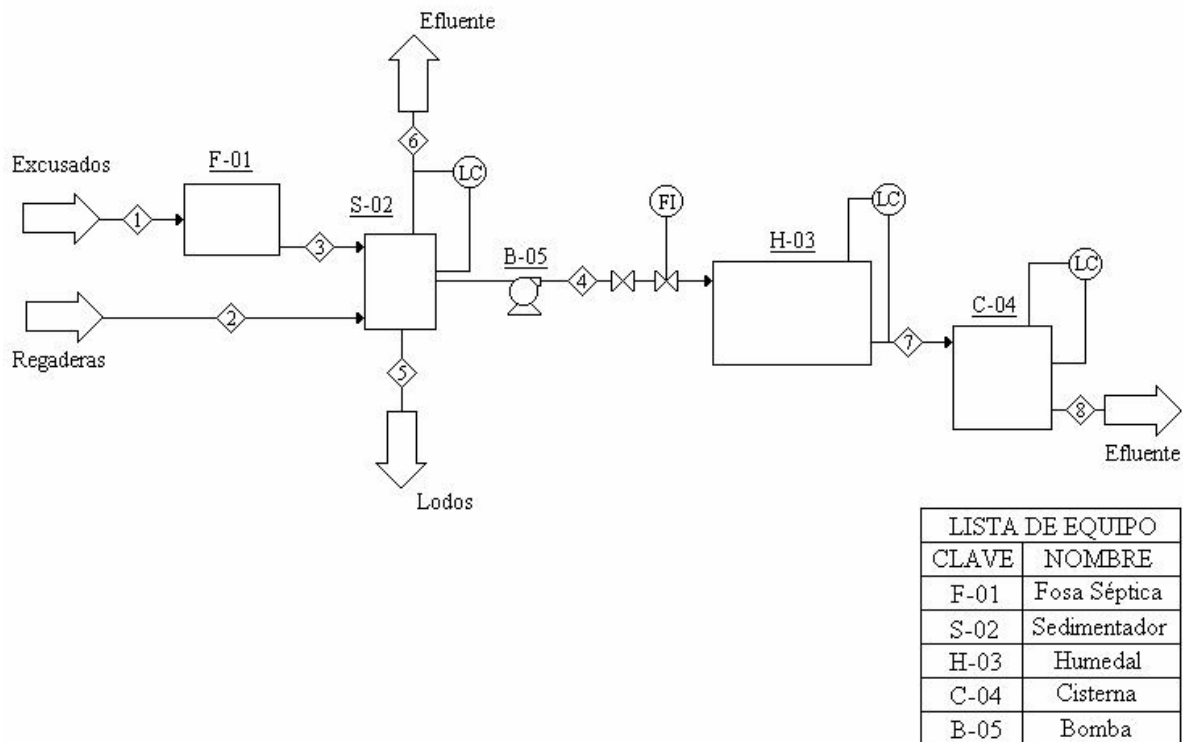


Figura 3.2b Diagrama esquemático del sistema de humedales de flujo vertical localizado en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria



Figura 3.2c Fotografía de los sedimentadores primarios del humedal artificial de flujo vertical localizado en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria

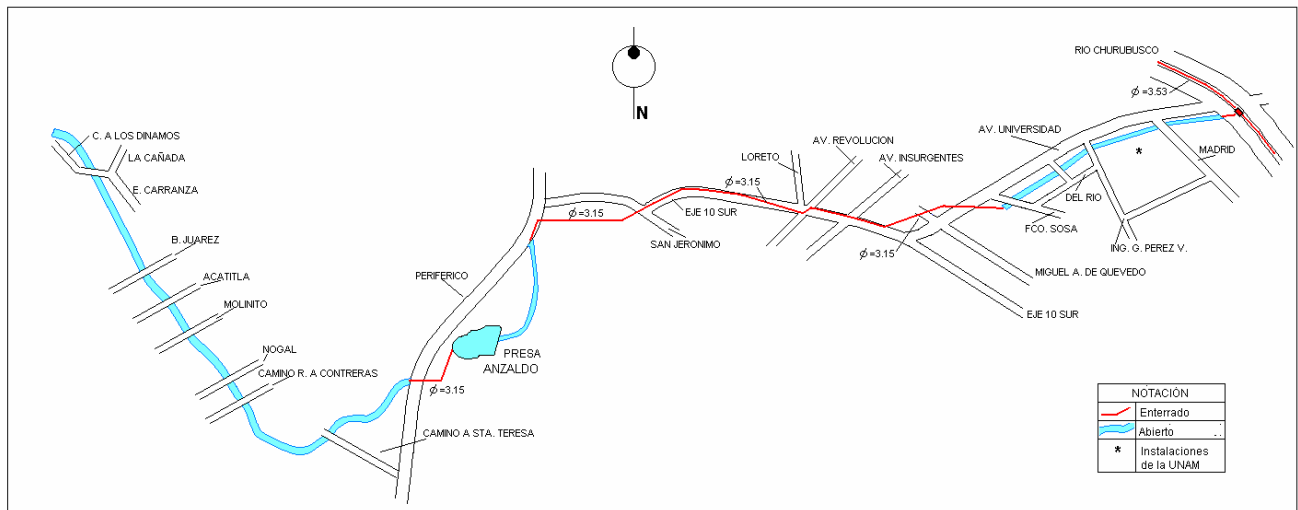


Figura 3.3 Río Magdalena desde su nacimiento en Los Dínamos hasta su unión con los ríos Mixcoac y Churubusco

### 3.3 Material foliar y cañas de las hidrofitas

Los residuos vegetales de los humedales artificiales en estudio, que son la biomasa foliar y las cañas, se obtienen cada seis meses cuando se realiza la poda de los dos sistemas. Se reducen de tamaño en una trituradora (Figura 3.4) para que se pueda llevar a cabo un proceso rápido de degradación (Sztern y Pravia, 1999). Esta máquina simplemente los recorta, especialmente a las cañas (de una altura de 2 a 3 m a trozos de 10 cm). El material semiseco se almacenó en cubetas en un cuarto frío (4°C).



Figura 3.4 Reducción de tamaño del material biológico del corte de carrizos



### 3.4 Métodos analíticos

- Para obtener el valor del carbono orgánico total se determinó con la ecuación (Golueke, 1977), referida en el Anexo 2:

$$\% \text{ COT} = \frac{(100 - \% \text{ Cenizas})}{1.8}$$

- Los valores de pH se obtienen con la ayuda de un potenciómetro después de homogeneizar por 10 min, 10 g de muestra en 90 mL de agua destilada dejando reposar 30 min según la Norma Mexicana AA-25, 1984 (Anexo 2).
- Para determinar el N elemental se emplea un analizador elemental Carlo Erba modelo EA/NA1110, según las instrucciones del fabricante.
- La humedad de la "composta" se determinó con una estufa de laboratorio de acuerdo a la Norma Mexicana AA-16-1984 (Anexo 2):

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{peso húmedo de la muestra} - \text{peso de seco de la muestra}}{\text{Peso húmedo de la muestra}} \times 100$$

- Los valores de sólidos totales y volátiles se obtuvieron de acuerdo con los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, AWWA, WPCF, 1992), los cuales están referidos en el Anexo 2.
- Para la determinación de la temperatura se utilizó un termómetro de mercurio graduado en °C, con una medición puntual al centro de la "composta", tomada siempre a la misma hora.
- Para el análisis microbiológico se utilizó la Norma Oficial Mexicana 004 (DOF, 2002), considerando huevos de helmintos y coliformes fecales. En el caso específico de los huevos de helminto (nemátodos), se determinó su viabilidad siguiendo la metodología de la norma, que se encuentra ya estandarizada en el Laboratorio de Biología de la Facultad de Química de la UNAM, por incubación, adicionando 1 mL de ácido sulfúrico 0.1N, a 26°C, dejándolos por cuatro semanas. Este estudio de viabilidad permite observar si se forman larvas después del lapso de incubación. En los Anexos 1 y 3 se presenta esta norma a detalle incluyendo las determinaciones de huevos de helmintos y coliformes fecales.



### 3.5 Arranque de los reactores

Se inició la experimentación de los reactores de acuerdo con las condiciones de operación de la Tabla 3.1. Como se mencionaba en la introducción, el material a utilizar depende del área geográfica, tipo de cultivo y estaciones del año, por lo que se decidió utilizar únicamente el lodo residual y los residuos de la poda del humedal, sin adicionar ningún otro material, lo cual hace de este sistema una operación sustentable o sostenible.

Se tomaron muestras de los lodos primarios obtenidos de los dos diferentes sedimentadores primarios, así como de la materia vegetal y se mezclaron con dos diferentes relaciones lodos-carrizo, seleccionadas de acuerdo con la literatura: para Iñiguez y Vaca (2000), quienes utilizaron una relación de 1:1.5 en sus "compostas" y Francou *et al* (2005) que utilizaron la proporción 1:2 lodos-desecho de jardinería.

Tabla 3.1 Condiciones de operación y nomenclatura de los reactores

REACTOR (Proporción lodo:carrizo)	ORIGEN DEL LODO PRIMARIO	MASA DE CARRIZO (kg)	MASA DE LODOS (kg)	MASA TOTAL INICIAL (kg)
ZC 1 (1:2)	Zona Cultural	3	1.5	4.5
ZC 2* (1:2)	Zona Cultural	3	1.5	4.5
ZC 3 (1:1)	Zona Cultural	3	3	6
ZC 4** (1:1)	Zona Cultural	3	3	6
VV 1 (1:2)	Vivero Forestal de Coyoacán	3	1.5	4.5
VV 2+ (1:2)	Vivero Forestal de Coyoacán	3	1.5	4.5
VV 3 (1:1)	Vivero Forestal de Coyoacán	3	3	6
VV 4** (1:1)	Vivero Forestal de Coyoacán	3	3	6

\* Réplica de ZC 1

+ Réplica de VV 1

\*\* Réplica de ZC 3

\*\* Réplica de VV 3

Los reactores se llenaron como sigue:



Para los primeros dos reactores con lodos del Vivero de Coyoacán, VV1 y VV2, se consideraron relaciones 1:2 poniendo una capa de 1 kg de hidrofitas (Figura 3.5a), después una capa de 0.5 kg de lodo y así sucesivamente hasta tener 1.5 kg de lodo y 3 kg de hidrofitas (por lo que serían 6 capas, 3 de las plantas y 3 de lodos). Para los siguientes dos reactores, VV3 y VV4, con una relación 1:1, se tuvo primeramente una capa de 1 kg de hidrofitas seguida por una de 1 kg de lodos (Figura 3.5b), hasta llegar a 3 kg de hidrofitas y 3 kg de lodos (teniendo 6 capas, de las cuales 3 son de plantas y 3 de lodos). Las alturas alcanzadas en los reactores por el material mezclado fue de 30 cm, por lo que el volumen real utilizado de los reactores fue de  $0.0191\text{m}^3$  (Anexo 5).

De la misma manera se prepararon los otros 4 reactores con lodos del sedimentador primario del sistema de la Zona Cultural.

El diseño del experimento fue como sigue:

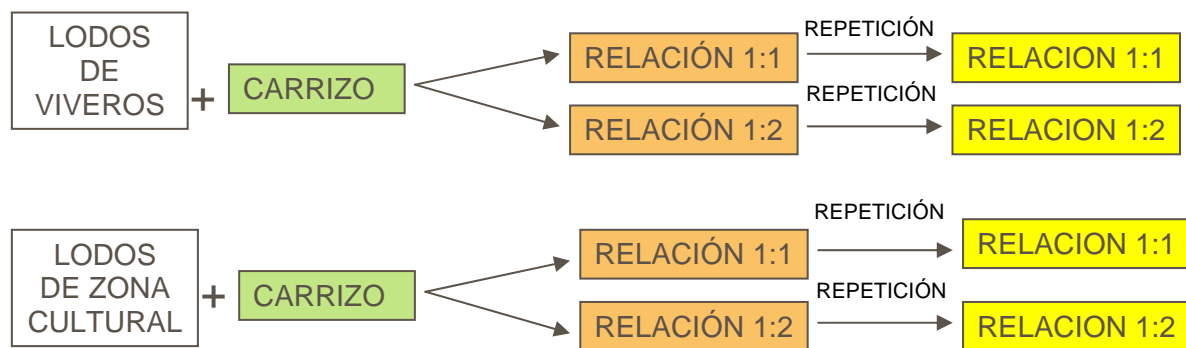


Figura 3.5a Volumen de 1 kg de hidrofitas



Figura 3.5b Volumen de 1 kg de lodos





El tiempo programado para las biorreacciones o "composta" fue de 12 semanas, ya que es el recomendado por la literatura, seguido de un periodo de maduración o curado, es decir, cuando la materia orgánica se estabilice y no represente un posible daño al medio ambiente, que fue de 10 semanas (Francou *et al.*, 2005; Íñiguez y Vaca, 2001).

Todas las pruebas analíticas que se realizaron fueron con el fin de verificar el estado de la "composta", observar su desarrollo y, en caso dado, ajustar el tiempo esperado, pues puede obtenerse el grado deseado de estabilización antes o después de este lapso (cuando los cambios químicos en composición sean  $\pm 10\%$  del último valor anterior).

Posteriormente, se colocaron los reactores en el laboratorio en un "cuarto a temperatura controlada", originalmente a una temperatura de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ , para simular la temperatura ambiente promedio de los sistemas de humedales artificiales en estudio. Cada reactor se pesó y se midieron los volúmenes aparentes de los componentes (lodos e hidrofitas) para determinar su masa y volúmenes al inicio y al final del tratamiento. Se tomaron también temperaturas con un termómetro de bulbo de mercurio de manera manual colocado en el centro de los reactores durante 120 s en forma diaria (lunes a viernes), a la misma hora, hasta alcanzar la maduración (considerada como tal cuando ya no hubiera cambios de temperatura de  $\pm 2^\circ\text{C}$ ).

Las "mesetas" teóricas de temperatura constante en la región termófila (Figura 2.4) son de aproximadamente 10 a 20 días (Horsley, 2004). Para los experimentos en estos reactores, esto no ocurrió. Consecuentemente, los reactores se recubrieron con material aislante para reducir una posible disipación del calor generado por las reacciones de oxidación con la meta de obtener las temperaturas adecuadas para "pasteurizar" los lodos y eliminar los organismos patógenos. Como, a pesar de este recubrimiento, la temperatura no mostraba incrementos durante las mediciones, se cubrieron con una bolsa de plástico que, aunque promovió condiciones anaerobias, evitó la evaporación de agua (que tomaría el calor de vaporización del seno de la "composta"). Al mezclar diariamente en forma manual se introducía oxígeno atmosférico (Anexo 5), buscando con ello mejorar la transferencia de masa y calor. Finalmente, se incrementó la temperatura del cuarto donde se encontraban a  $28 \pm 2^\circ\text{C}$  para corroborar el efecto de la temperatura en los reactores.



### 3.6 Alcance de condiciones estables

Al terminar de colocar las capas en cada reactor se procedió a revolver cada uno de ellos con una pala y un bieldo de jardinería para que quedara totalmente homogeneizado. Algo importante en el momento de colocar las capas fue que la materia foliar estuviera homogénea. Para obtener las masas iniciales y finales se utilizó una báscula de 25 kg (Figura 3.6). Los reactores previamente señalizados con su nomenclatura se instalaron en el cuarto de temperatura controlada y se empezaron a airear al 5º día para que la temperatura pudiera elevarse al llevarse a cabo las reacciones aerobias (Iñiguez y Vaca, 2001). El día 5 se mezclaron con un bieldo para homogeneizar y airear el material en descomposición. Posteriormente, se dejaron en reposo 24 horas para volver a mezclar y así sucesivamente durante el periodo de biorreacción ("composta").

Se tomaron muestras iniciales de lodos y material foliar y cañas al arranque de los experimentos, a las cuales se les midieron C, N, contenido de humedad, valor de pH, cenizas y análisis microbiológicos (huevos de helmintos y coliformes fecales), empleando las metodologías estandarizadas (DOF, 2002) (Anexo 2).



Figura 3.6 Báscula de 25 kg

Al término de los experimentos se hicieron los mismos análisis con objeto de evaluar la eficiencia de eliminación de los organismos indicadores y de los contenidos de C, N, así como de las características finales de la "composta" (pH, % de humedad y cenizas). Para el C y el N se tomó una muestra a la mitad del tiempo de experimentación (semana 7) para comprobar la disminución de la masa total. Cada semana se tomaron muestras del





material "sólido" y del lixiviado y se les midió el % de humedad y el valor de pH. Al término de los experimentos se verificó la reducción de volumen y masa y las características físicas subjetivas (olor y color) de los productos de descomposición ("composta").

### 3.7 Pruebas toxicológicas

De acuerdo con la literatura (Ayuso *et al.*, 1992; Berton *et al.*, 1989; Gajdos, 1997; García *et al.*, 1999; McCallum *et al.*, 1998; Miralles-de-Imperial *et al.*, 1994; Murillo *et al.*, 1993; Sims *et al.*, 1993), los lodos primarios presentan aspectos negativos para usarlos como abono, ya que pueden contener sustancias tóxicas, ya sean metales pesados, compuestos orgánicos no biodegradables, alta concentración de sales, etc., así como la presencia de microorganismos potencialmente patógenos que pueden influir negativamente tanto en los suelos como en los cultivos. Ensayos de germinación de semillas realizados por Miralles de Imperial *et al.* (1994), con *Triticum aestivum* (trigo), *Zea mays* (maíz), *Lolium perenne* (o "rye-grass" un tipo de pasto, césped muy usado en los EEUU), *Lens sculenta* (lenteja), *Lycopersicon esculentum* (jitomate), *Vicia faba* (habas) y *Avena sterilis* (avena), revelaron que los extractos de lodo fresco y "compostado" tienen un efecto negativo sobre la germinación y el tiempo medio de germinación, que depende de la concentración del extracto y de las especies ensayadas. Estos efectos son lo suficientemente notorios como para que se recomiende precaución en su uso. Las pruebas toxicológicas que se realizaron de la "composta" final y de los lodos sin tratar, en esta investigación se hicieron usando semillas de maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*), los cultivos más importantes en México, para corroborar su inocuidad, siguiendo la metodología realizada por Miralles-de-Imperial *et al.* (2002). Ésta consiste en sembrar las semillas en macetas (reactores), de 10 cm de diámetro, que contienen un "sustrato puro" (150 g de tierra negra comercial y 150 g de arena de mar lavada de grano fino de 0.25-0.30), con los productos de descomposición de cada reactor (agregados como mejoradores de suelos) aplicando una dosis de 40 t ha<sup>-1</sup> en base seca (Acosta *et al.*, 2000, Miralles-de-Imperial *et al.* 2002), considerando el área superficial de las macetas. Se incluyeron como controles un reactor con sustrato puro solamente y otro con sustrato puro y lodo fresco con una dosis de 40 t ha<sup>-1</sup> en base seca para cada uno de los humedales (Tabla 3.2). Como tratamientos adicionales para verificar la emergencia de las plántulas dependiendo del sustrato, se sembraron otros reactores con únicamente "composta" terminada y otros con lodo fresco y carrizos (con una relación 1:1) con la



finalidad de comparar una "composta" al inicio (sin reacciones bioquímicas) y una "composta" terminada (Tabla 3.3). Las semillas de maíz se obtuvieron de los laboratorios del Departamento de Bioquímica de la Facultad de Química de la UNAM y las de frijol fueron suministradas por el Colegio de Posgraduados (Montecillo, Texcoco, México). La variedad de maíz fue tipo chalqueño blanco criollo. La semilla de frijol fue la variedad OTI originaria de variedades mejoradas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, del Gobierno Federal (Estrada-Gómez *et al.*, 2004). Ambos tipos de semillas provienen de variedades genéticas relativamente homogéneas, desde el punto de vista de su variabilidad genotípica.

Tabla 3.2 Contenido de las macetas para el estudio de la factibilidad de utilizar "composta" como mejorador de suelos

CONTENIDO	CANTIDADES				MACETAS	
	Sustrato puro	Agregado			Maíz	Frijol
		Base seca	Base húmeda	Equivalencia		
<b>Sustrato puro</b> (50% tierra negra+ 50% arena)	300 g	-	-	-	3	3
<b>Sustrato puro</b> + "composta" ZC	300 g	31.4 g	143 g	40 t ha <sup>-1</sup>	3	3
<b>Sustrato puro</b> + lodo ZC	300 g	31.4 g	298 g	40 t ha <sup>-1</sup>	3	3
<b>Sustrato puro</b> + "composta" VV	300 g	31.4 g	97.92 g	40 t ha <sup>-1</sup>	3	3
<b>Sustrato puro</b> + lodo VV	300 g	31.4 g	144 g	40 t ha <sup>-1</sup>	3	3
Total					15	15

Tabla 3.3 Tratamientos adicionales de "composta" al inicio y término de su proceso de degradación

CONTENIDO	CANTIDADES EN BASE HÚMEDA	MACETAS	
		Maíz	Frijol
"Composta" ZC	143 g	3	3
Lodo ZC + carrizo (1:1)	100g lodo + 100g carrizo	3	3
"Composta" VV	97.92 g	3	3
Lodo VV + carrizo (1:1)	100g lodo + 100g carrizo	3	3
Total		12	12



En cada maceta se sembraron 20 semillas de las especies ya mencionadas. Todas las relaciones estudiadas se hicieron por triplicado. Se les agregó agua desionizada durante 28 días, que fue la duración del experimento. Se adicionó el agua pesando las macetas o reactores diariamente y la cantidad agregada mantenía el peso original constante. Esta metodología es la que presentaron Miralles-de-Imperial y colaboradores (2002).

Las 54 macetas se colocaron en el costado de un vivero ubicado en Jiutepec, Morelos, México (Figura 3.7), donde la temperatura promedio ambiental era de 21°C (clima semicálido). Los parámetros de evaluación para las plantas que emergieron de las semillas fueron el número de plántulas emergentes (PE) con respecto del total de semillas sembradas y la longitud del tallo (LT) y la longitud de la raíz (LR) al final del experimento (28 días).



Figura 3.7 Ubicación de las macetas de maíz y frijol

### 3.8 Análisis estadísticos

Para determinar la confiabilidad, exactitud y precisión de los resultados experimentales se empleó el paquete de cómputo "Statgraphics plus", siguiendo las instrucciones de la paquetería.

Para realizar el análisis de varianza de los parámetros de medición de la "composta" se consideró un solo factor, el cual es el lodo de Zona Cultural o el lodo del Vivero Forestal de Coyoacán con dos niveles o tratamientos distintos (proporciones 1:1 y 1:2) y su



respectiva repetición. Las variables de respuesta fueron los parámetros evaluados (humedad, pH, temperatura, contenido de C y N, contenido de huevos de helminto y de coliformes fecales). El análisis se tomó como completamente aleatorio para todos los casos (Montgomery, 1997).

Para el estudio de la variabilidad de las respuestas: plantas emergentes (PE), la longitud del tallo (LT) y la longitud de la raíz (LR).se utilizó un solo factor, el cual era el tipo de sustrato con 5 niveles para PE y 3 niveles para LT y LR: Sustrato puro (como control), sustrato puro + lodos y sustrato puro + "compostas" y lodo crudo (como control), "compostas" solas (como segundo control).

Es importante mencionar que los dos lodos primarios estudiados (del Vivero Forestal de Coyoacán y de la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria), no son representativos de ninguna planta de tratamiento "real" (uno, porque el agua contaminada viene de un río cuyo caudal y composición son modificados al arbitrio del personal del Sistema de Aguas del Distrito Federal, México y, el otro, porque proviene de una fosa séptica que actúa realmente como sedimentador primario y sus excedentes son los que van a dar al "sedimentador primario" del humedal artificial ubicado en la zona cultural de la UNAM, que es del que podían tomarse las muestras). Por ello, cualquier análisis estadístico comparativo entre los resultados de cada uno de estos lodos entre ellos mismos y con respecto a otros lodos primarios definidos en la literatura, no tienen validez para ningún uso futuro de investigación.



## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados experimentales obtenidos

#### 4.1.1 Caracterización de los materiales

Primeramente se realizó la caracterización de los materiales utilizados que, como se ha mencionado anteriormente, eran los lodos provenientes de los sedimentadores primarios de los dos humedales (uno ubicados en la Zona Cultural de la UNAM y el otro en el Vivero Forestal de Coyoacán) y el producto de los recortes de las hidrofítas de los mismos humedales (*Phragmites spp*). Los datos experimentales obtenidos en esta investigación se encuentran en el Anexo 5. La Tabla 4.1 presenta un resumen de la caracterización de los materiales estudiados.

Tabla 4.1 Caracterización de los materiales

	% de humedad	% Sólidos totales	% Ceniza	% Sólidos volátiles
Lodo Zona Cultural	99.12	0.88	60.57	39.43
Lodo Viveros	78.16	21.84	75.01	24.99
Carrizo	70.45	29.55	7.71	92.29

	% COT	%N	Relación C/N	pH
Lodo Zona Cultural	21.91	1.61	13.62	7.362
Lodo Viveros	13.88	0.94	14.77	7.09
Carrizo	51.27	3.41	15.03	-

	Coliformes fecales NMP/100 cm <sup>3</sup>	Huevos de helminthos HH / g ST
Lodo Zona Cultural	3 x 10 <sup>6</sup>	245
Lodo Viveros	4 x 10 <sup>6</sup>	285

Después de la caracterización de los materiales se procedió a montar los reactores de acuerdo con la metodología mencionada en el capítulo anterior.



#### 4.1.2 Evolución de los parámetros de medición en las etapas de biorreacción y maduración

Los reactores en estudio se mantuvieron en el cuarto de temperatura controlada durante 12 semanas (etapa de biorreacción o "composta").

Posteriormente, los reactores se dejaron en un periodo de maduración de 10 semanas más en un invernadero abierto. Esta maduración permitió que la formación de "humatos" se consolidara. Los ácidos húmicos, fúlvicos y huminas no se evaluaron químicamente sino que se consideraron solamente parámetros sensoriales, especialmente el olor y color, ya que cuando el material está maduro o curado huele a tierra mojada "de hoja" y es de color casi negro o negro. Se consideró que la materia orgánica era estable, cuando los parámetros de seguimiento (temperatura, pH, C y N) no variaban  $\pm 10\%$  del último valor anterior (Francou *et al.*, 2005; Íñiguez y Vaca, 2001).

Los resultados de las mediciones de temperatura, contenido de humedad, pH de la "composta" y de los lixiviados, relación C/N del material biológico y los análisis microbiológicos, a lo largo del proceso de biodegradación, se presentan a continuación.

Para realizar el análisis de varianza se consideró un factor, el cual es en cada caso el lodo de la Zona Cultural y el lodo del Vivero Forestal de Coyoacán. Las variables de respuesta fueron cada uno de los parámetros evaluados, con dos niveles, puesto que fueron dos tratamientos distintos (1:1 y 1:2) y su respectiva repetición. El análisis se tomó como completamente aleatorio para todos los casos (Montgomery, 1997). Los análisis estadísticos de los resultados experimentales se presentan en el Anexo 6.

Las nomenclaturas de los reactores, como ya se mencionó en el capítulo anterior, se manejaron de la siguiente manera:

REACTOR	ORIGEN DEL LODO PRIMARIO	RELACIÓN LODO-CARRIZO
ZC 1	Zona cultural	(1:2)
ZC 3	Zona cultural	(1:1)
VV 1	Vivero Forestal de Coyoacán	(1:2)
VV 3	Vivero Forestal de Coyoacán	(1:1)



## Temperatura

Puede verse de la Figura 4.1 que, al inicio del proceso, se obtuvo un incremento inicial de la temperatura hasta alrededor de 30°C (29-31°C, fase mesófila), considerando que la temperatura del cuarto donde estaban ubicados los reactores estaba a 22.5°C y la de los materiales, al inicio, estaban a 4°C (ya que se encontraban almacenados en un cuarto "frío" para evitar su descomposición). Esto indica actividad metabólica de los organismos que proliferaron en esta etapa en los reactores. A partir del día 10 se observó que la temperatura empezó a disminuir hasta aproximadamente 25°C. Debido al tamaño de los reactores, se consideró que la transferencia de calor hacia el exterior era alta, ya que subjetivamente se sentía caliente el aire alrededor de los reactores.

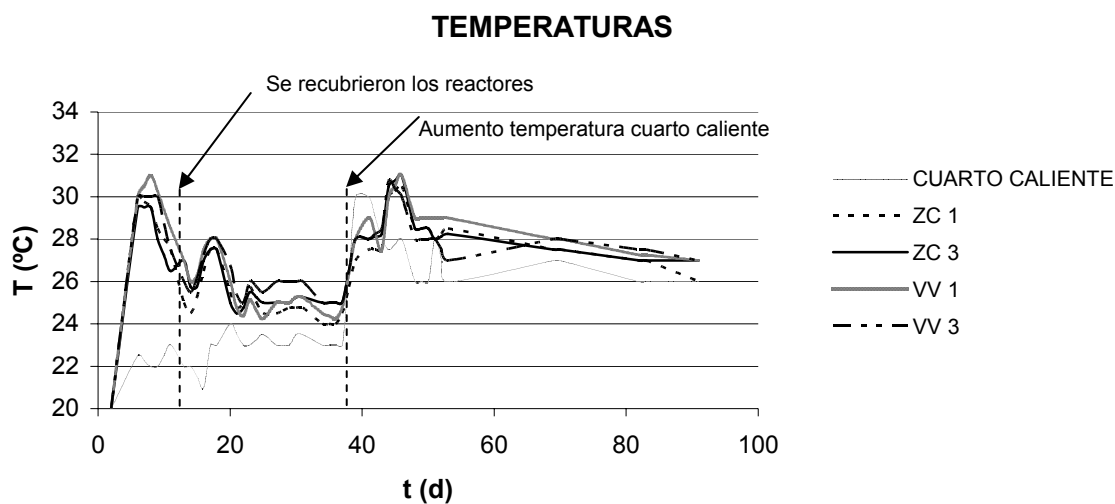


Figura 4.1 Perfiles de temperatura versus tiempo (Reactores Zona Cultural 1–relación lodo-carrizo 1:2, Zona Cultural 3–relación lodo-carrizo 1:1; Viveros 1–relación lodo-carrizo 1:2; Viveros 3–relación lodo-carrizo 1:1) durante la etapa de biodegradación (en la etapa de maduración no se midieron las temperaturas)

Al recubrir las paredes externas de los reactores con material aislante, las temperaturas aumentaron hasta 27-29°C pero, al cabo de 5 días, se repitió el fenómeno de reducción de las temperaturas hasta 24.5°C, la cual se mantuvo constante durante los días subsiguientes (alrededor de 2°C arriba de la temperatura del cuarto), siguiendo las tendencias de las curvas de comportamiento reportadas en la literatura (Horsley, 2004; Negro *et al.*, 2000). Para corroborar el efecto de la temperatura ambiente, se modificó el control de temperatura del cuarto hasta 28°C. La temperatura de la masa de los reactores



se mantuvo nuevamente 2°C arriba de la temperatura ambiente. Como ya la temperatura permanecía constante, es decir, que ya no presentaba cambios de  $\pm 2^\circ\text{C}$  en sus valores se consideró que la fase de descomposición activa había terminado y que la fase de maduración o curado de la "composta" había comenzado (Metcalf y Eddy, 1991; Negro *et al.*, 2000). Es obvio que, al trabajar en un cuarto "hermético" a temperatura controlada, no puede haber la misma disponibilidad de oxígeno que en un sitio abierto a la atmósfera y que esto influye en la "oxidación bioquímica" de la materia orgánica, así como en la pérdida de agua por evaporación. Sin embargo, esta situación no podía modificarse ya que esta fase experimental debía realizarse en este cuarto, donde no había contacto con otras personas ajenas al experimento.

Cuando se realizó el análisis de varianza de la variabilidad de respuesta de la temperatura de cada día se observó que no existe significancia para los dos tipos de lodos (Zona Cultural y Vivero Forestal de Coyoacán) en estudio, ni al 5 ni al 1%.

La temperatura ya no cambió en la etapa de maduración, cuando se retiraron del cuarto de temperatura controlada, sino que se mantuvo con un decrecimiento paulatino hasta alcanzar el equilibrio con la temperatura del ambiente.

Los factores que se consideran de mayor relevancia en la "composta" con lodos de tratamiento de aguas residuales, son el porcentaje de humedad y la temperatura que alcanza la mezcla. El porcentaje de humedad es importante porque al tratarse de un proceso aerobio es necesario que en el volumen de la muestra haya posibilidades de un "ingreso" eficiente del oxígeno a las células que realizan la "oxidación bioquímica". Cuando se trata de un lodo conteniendo organismos potencialmente patógenos es importante alcanzar temperaturas altas ya que de esta forma pueden eliminarse por pasteurización algunos de los organismos no deseados (Liang *et al.*, 2003; Maynard, 2000).

### **Contenido de humedad**

La humedad inicial fue alta, aproximadamente 80%, ya que los lodos no estaban espesados pues fue así como se obtuvieron de los sedimentadores y se quiso que el sistema de "composta" se iniciara conforme se debiera tener en un sistema real en una





comunidad (Figura 4.2), donde no es recomendable que se realice el espesamiento usando lechos de secado, como se hace en la mayor parte de los casos donde existen plantas de tratamiento de aguas residuales y que puede ser una de las causas de la alta incidencia de enfermedades gastrointestinales (ver Tabla 2.2), ya que se debe tener extremo cuidado en las condiciones de operación de esos lechos para evitar, no solamente cualquier contacto de los lodos sin tratar con las personas de la comunidad, sino de que el viento transporte partículas de lodo a las zonas habitadas. El contenido de humedad durante todo el periodo de estabilización se mantuvo prácticamente constante, disminuyendo justamente en la etapa de maduración (que ya se hizo a condiciones "abiertas" y en las que muy probablemente la transferencia de masa fue el mecanismo predominante de la deshidratación).

Al igual que la temperatura al realizarse el análisis de varianza de la variabilidad de la respuesta del porcentaje de humedad se observa que no hubo diferencias significativas en ninguna de las semanas, considerando un intervalo de confianza de 95 y 99%.

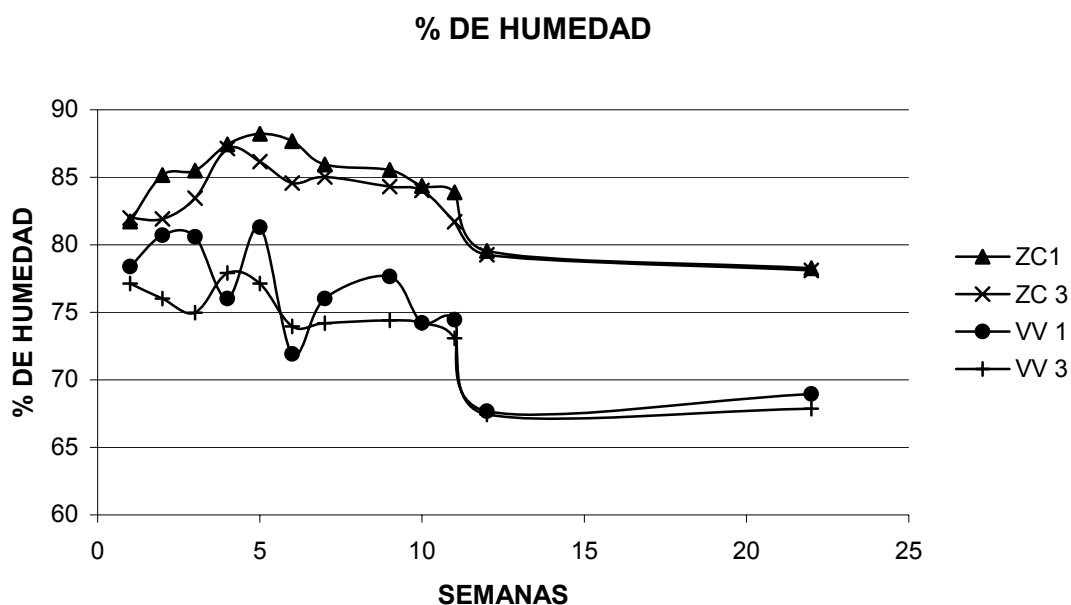


Figura 4.2 Contenido de humedad, %, versus tiempo (Reactores Zona Cultural 1–relación lodo-carrizo 1:2, Zona Cultural 3–relación lodo-carrizo 1:1; Viveros 1–relación lodo-carrizo 1:2; Viveros 3–relación lodo-carrizo 1:1)



## Relación Carbono/Nitrógeno

En las semanas 1, 7, 12 y 22 (Tabla 4.2) se obtuvieron muestras secas del material, con las cuales se determinó el contenido de N elemental así como la obtención de las cenizas para sacar el valor del carbono orgánico total (COT).

Tabla 4.2 Relación C/N al inicio, intermedio y final del proceso

REACTOR	RELACIÓN C/N			
	SEMANA 1	SEMANA 7	SEMANA 12	SEMANA 22
ZC1	18.30	13.73	12.41	10.21
ZC 3	20.33	17.51	13.38	10.64
VV 1	20.89	17.82	13.68	14.02
VV 3	18.53	17.53	13.33	13.64

(Reactores ZC1–relación lodo-carrizo 1:2, ZC3–relación lodo-carrizo 1:1;  
VV1–relación lodo-carrizo 1:2; VV3–relación lodo-carrizo 1:1)

Existió una disminución en la relación carbono/nitrógeno como se puede apreciar en la Figura 4.3, hasta que todos los valores quedaron comprendidos entre 10 y 15, los cuales con base en la literatura, son los esperados (Sztern y Pravia, 1999), lo que significa que se logró una degradación de la materia orgánica presente en los reactores, especialmente la carbonosa, transformándose en CO<sub>2</sub>.

La relación C/N ha sido usada por los investigadores como índice de la estabilidad o madurez. Bernal *et al.* (1998) proponen un valor menor a 20 para esta relación, mientras que Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1989) consideran que debe ser inferior a 12 en una "composta" madura. Una "composta" se considera madura cuando la relación C/N es menor de 25 o más cercana a 15 (Pascual *et al.*, 1997). Este valor de referencia tiene como inconveniente la variabilidad de los materiales originales que forman las "compostas" y su determinación analítica puede tener errores debido al proceso de secado y tamizado de las muestras en el laboratorio, que puede conducir a pérdidas por volatilización de N, en forma amoniacal, en "compostas" inmaduras (Defrieri *et al.*, 2005).

Negro *et al.* (2000), Metcalf y Eddy (1991), Iglesias-Jiménez y Perez-García (1989), entre otros autores, sustentan que la fase de maduración o de curado comienza cuando ya no



existen diferencias importantes en los parámetros de seguimiento que son, además de la temperatura, el pH y la relación C/N. De acuerdo con los valores de estas variables, en esta experimentación, la fase de descomposición activa había terminado y había empezado una fase de descomposición mucho más lenta que no se refleja en los parámetros de seguimiento. Esta descomposición de las mezclas implica cambios en las sustancias húmicas pero como éstas no se evaluaron químicamente y, como ya se mencionó, se consideraron solamente parámetros sensoriales, especialmente el olor y color, ya que cuando el material está maduro o curado huele a tierra mojada "de hoja" y es de color casi negro o negro.

Al realizarse el análisis de varianza de la variabilidad de la respuesta de la relación C/N en cada una de las semanas medidas, se observa que no hubieron diferencias significativas en ninguna de las semanas, considerando un intervalo de confianza de 95 y 99%.

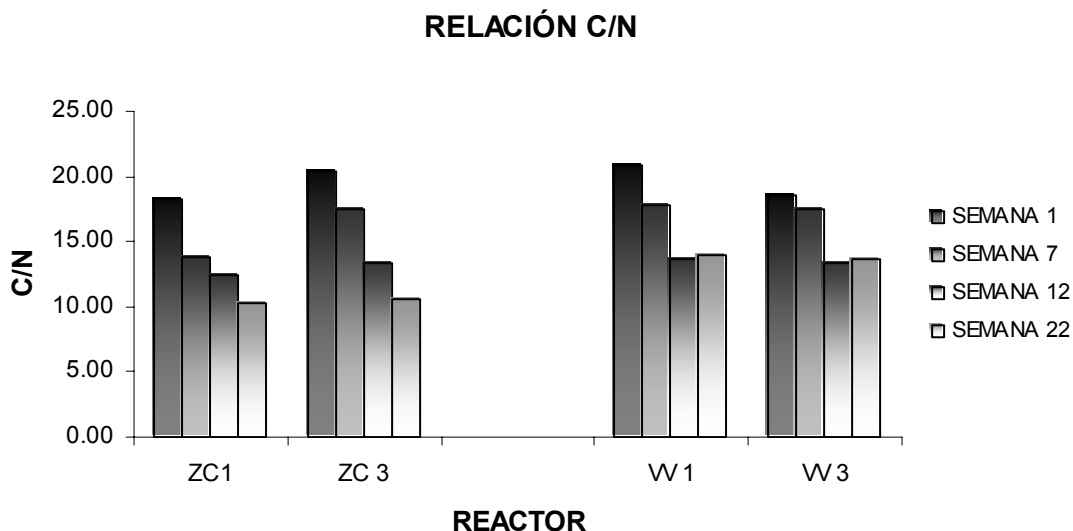


Figura 4.3 Relación C/N de los reactores de "composta" (Reactores ZC1–relación lodo-carrizo 1:2, ZC3–relación lodo-carrizo 1:1; W1–relación lodo-carrizo 1:2; W3–relación lodo-carrizo 1:1)

### Masa y volumen

La disminución de masa y volumen se observa en la Tabla 4.3, en donde se llegaron a tener porcentajes de hasta 83.33% en reducción de volumen y de hasta 40% en masa. Los porcentajes de reducción de masa pueden variar de una experimentación a otra. Por



ejemplo, Sánchez y Mayoral (2003) obtuvieron una reducción del 68% de la masa en reactores de "composta" de 1 x 1 x 1 m. También Íñiguez y Vaca (2001) obtuvieron un 56% de pérdida de masa en su experimentación con pilas de "composta" de un tamaño mayor 2.5 x 2.5 y 1.5 m de alto. En relación con el porcentaje de reducción de volumen también se ha encontrado en la literatura que, en las mismas condiciones experimentales y distintos tipos de materiales sometidos a degradación por "compostas", pueden variar de 44 hasta 58% (Breitenbeck y Schellinger, 2004).

Al igual que en los parámetros medidos anteriormente, cuando se realizó el análisis de varianza de la variabilidad de respuesta de la masa y del volumen al inicio y al final del tratamiento se observó que no existe significancia entre las muestras a las diferentes proporciones para los dos diferentes lodos estudiados (Zona Cultural y Vivero Forestal de Coyoacán), ni al 5 ni al 1%.

Tabla 4.3 Porcentajes de disminución de peso y volumen

REACTOR	ORIGEN DEL LODO PRIMARIO	% REDUCCIÓN DE MASA	% REDUCCIÓN DE VOLUMEN
ZC 1	Zona Cultural	32.89	81.67
ZC 3	Zona Cultural	35.70	79.17
VV 1	Vivero Forestal de Coyoacán	42.16	75.00
VV 3	Vivero Forestal de Coyoacán	37.72	68.33

(Reactores: ZC1-relación lodo-carrizo 1:2, ZC3-relación lodo-carrizo 1:1; VV1-relación lodo-carrizo 1:2; VV3-relación lodo-carrizo 1:1)

### Valores de pH

En la Figura 4.4, se observan los valores de pH obtenidos de las "compostas" de cada reactor ("lavadas" con agua destilada). Al principio, como consecuencia del metabolismo microbiano fundamentalmente anaerobio (no se realizó ningún mezclado en los primeros cinco días), que transforma los complejos carbonosos fácilmente degradables, en ácidos orgánicos, el pH era bajo.



Este fenómeno se dio después de estos cinco días a pesar de mezclar todos los días, lo que indica que el mezclado manual no daba la suficiente cantidad de oxígeno para generar  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y el calor de reacción. Esto es especialmente crucial, ya que el cuarto de temperatura controlada tenía solamente  $18.75 \text{ m}^3$  de volumen y estaba cerrado todo el tiempo, con excepción de las visitas para airear mediante el mezclado con el bieldo y la pala y tomar las mediciones de temperatura y las muestras para evaluar humedad, pH y lixiviados generados (los cuales se recirculaban).

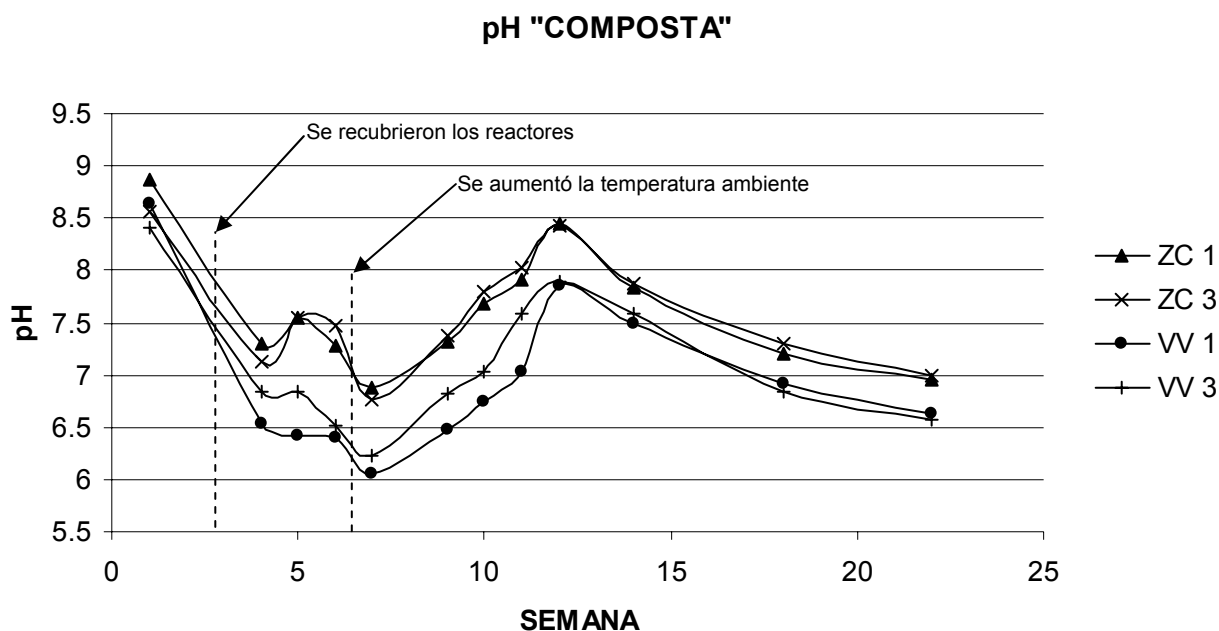


Figura 4.4 Variación del pH respecto al tiempo (Reactores: ZC1–relación lodo-carrizo 1:2, ZC3–relación lodo-carrizo 1:1; VV1–relación lodo-carrizo 1:2; VV3–relación lodo-carrizo 1:1)

Después de la cuarta semana, el pH de las "compostas" aumentó como consecuencia de la estabilización del material orgánico. Al aumentar la temperatura del cuarto, los valores de pH volvieron a decrecer indicando que las bacterias anaerobias vuelven a proliferar a pesar del mezclado manual para introducir aire (oxígeno). Finalmente, el pH se estabilizó en la fase final o de maduración (pH entre 6.6 y 6.9, para el Vivero Forestal y Zona Cultural, respectivamente).

Esto concuerda con lo reportado por Negro *et al.* (2000), quienes mencionan que durante el proceso de degradación con "composta" se producen diferentes procesos que hacen



variar al pH. Al principio, por el metabolismo fundamentalmente bacteriano se transforman los compuestos de carbono fácilmente degradables en  $\text{CO}_2$  o, si son más complejos, en ácidos orgánicos, por lo que el pH desciende. Ellos mismos mencionan que, después, el pH aumenta como consecuencia de la formación de amoníaco, alcanzando el valor más alto, alrededor de 8.5. Finalmente, los autores establecen que el pH disminuye en la fase final o de maduración (pH entre 7 y 8), debido a las propiedades naturales amortiguadoras de la materia orgánica.

Para el caso de los lodos de la Zona Cultural, en la primera semana, la variabilidad de los valores de pH estuvieron explicados por los distintos niveles (1:1 y 1:2) con un  $F^*=227.56$  y una  $p=0.044$ , para un intervalo de confianza de 95 y 99%. Para el resto de las semanas de biodegradación no existieron diferencias significativas de los dos niveles estudiados sobre los valores de pH. Para el caso de los lodos de los Viveros, el análisis de varianza de los valores obtenidos indica que hubo diferencias significativas solamente en la semana 10, con un  $F^*=31.39$  y una  $p=0.0304$  con un  $\alpha=0.05$ ; sin embargo, para las otras semanas no hubieron diferencias significativas.

Para los valores de pH de los lixiviados, la Figura 4.5 presenta los datos experimentales. Los valores de pH iniciales fueron similares a los de las "compostas". Posteriormente, hubo un ligero aumento y los valores de pH se mantuvieron entre 7 y 8.2. Después de la semana 7 ya no se tenían lixiviados en la "composta" de ninguno de los reactores. No fue necesario adicionar agua en las quince semanas restantes (5 de biorreacción y 10 de maduración).

Al analizar las diferencias significativas entre los valores de pH de los lixiviados pudo observarse que sí las había (al 5%) para los lodos de Zona Cultural.

Para los lodos de los Viveros se observa que hubo diferencias significativas en la última semana medida (semana 5), con un  $F^*=25.84$  y una  $p=0.0366$  a un intervalo de confianza del 95%. Como estas mediciones eran directas, probablemente al tomar la muestra (que era de 20 a 40 mL) no había homogeneidad entre ellas. Estos lixiviados se regresaban a sus respectivos reactores, así que las biocomunidades responsables de las conversiones de los materiales de las "compostas" re-estabilizaban el sistema, como puede observarse en las curvas de pH para las "compostas".

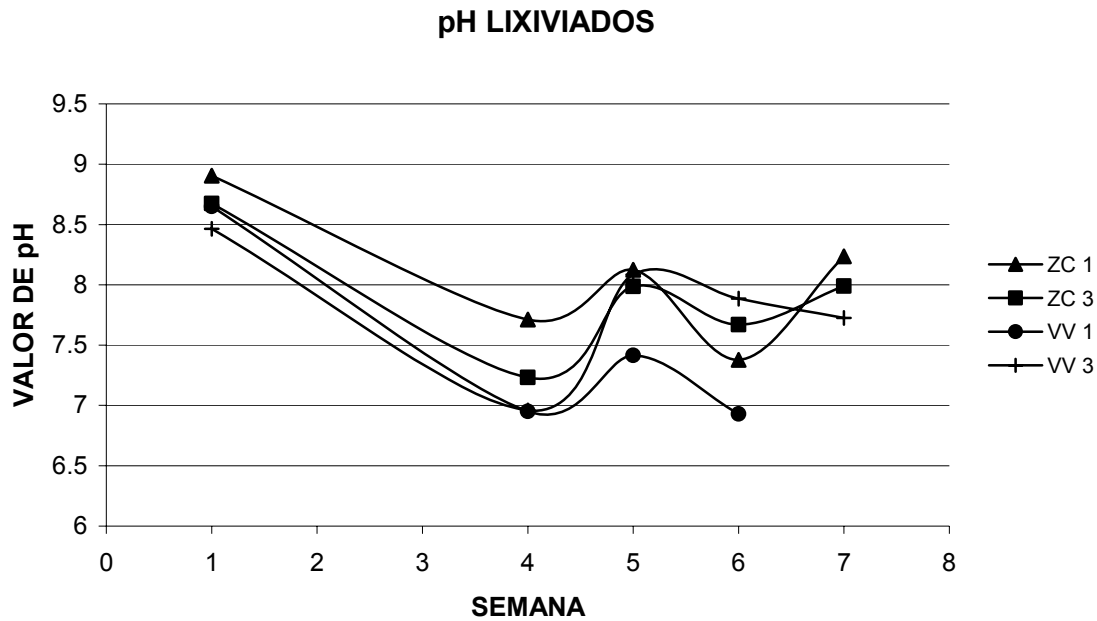


Figura 4.5 Comportamiento del pH de los lixiviados (\*a partir de la semana 7 ya no hubo lixiviados) (Reactores: ZC1–relación lodo-carrizo 1:2, ZC3–relación lodo-carrizo 1:1; VV1–relación lodo-carrizo 1:2; VV3–relación lodo-carrizo 1:1)

### Pruebas microbiológicas de huevos de helmintos y coliformes fecales

Los resultados de las pruebas microbiológicas para determinar la presencia de huevos de helmintos y de coliformes fecales se muestran en la Tabla 4.4.

En el análisis microbiológico de las condiciones iniciales se obtuvieron los siguientes resultados para los dos diferentes tipos de lodos:

#### Coliformes fecales

Lodos Viveros =  $4 \times 10^6$  NMP/100 cm<sup>3</sup>

Lodos Zona Cultural =  $3 \times 10^6$  NMP/100 cm<sup>3</sup>

#### Huevos de helmintos:

Lodos Viveros = 285 HH/g ST

Lodos Zona Cultural = 245 HH/g ST



Tabla 4.4 Resultados de las pruebas microbiológicas al final de la biodegradación

REACTOR	Coliformes fecales, NMP/100 cm <sup>3</sup>	Porcentaje de reducción de CF	Huevos de helminto, HH/g ST	Porcentaje de reducción de HH
ZC 1 (1:2)	5 x 10 <sup>4</sup>	<b>98.3</b> (2 "logs")	73	<b>70</b>
ZC 3 (1:1)	12 x 10 <sup>4</sup>	<b>96</b> (2 "logs")	77	<b>68</b>
VV 1 (1:2)	17.5 x 10 <sup>4</sup>	<b>99.9</b> (2 "logs")	133	<b>53</b>
VV 3 (1:1)	6 x 10 <sup>4</sup>	<b>98.5</b> (2 "logs")	155	<b>46</b>

Los datos obtenidos indican que la reducción de coliformes fecales fue de dos niveles logarítmicos. La "composta" resultante rebasa los límites para las clases A y B, pudiendo solamente utilizarse para áreas forestales y usos agrícolas (Tabla 2.2) que, para el caso del Vivero Forestal y de la Zona Cultural, sería justamente el uso que se le daría.

Si se considera el parámetro de los huevos de helmintos, los datos obtenidos indican que las "compostas" provenientes, tanto de los residuos del sistema de Zona Cultural como del sistema del Vivero Forestal de Coyoacán no pueden emplearse ni en zonas forestales ni agrícolas.

Dado que las cantidades de huevos de helminto fueron tan elevadas se realizó una búsqueda bibliográfica para verificar si se han reportado casos similares. En un estudio realizado en Ghana, África, Gallizzi (2003) informó que el contenido de huevos de helmintos, nemátodos principalmente (*Ascaris* y *Trichuris*), eran de 218-265 HH/g ST y que, en fosas sépticas, como es el caso de esta investigación, alcanzaban 242 HH/g ST. La viabilidad de estos huevos de helminto fue de 40 a 82% usando, tanto el método de la safranina, como el de incubación (con algunas ligeras modificaciones al aceptado por la normatividad mexicana, en temperatura y tiempo de incubación).





Por esta razón, además de contarlos, en el Laboratorio de Biología de la Facultad de Química de la UNAM, se llevó a cabo el estudio de viabilidad por incubación, como ya se mencionó en el Capítulo 3, adicionando 1 mL de ácido sulfúrico 0.1N, a 26°C, dejándolos por cuatro semanas. Este estudio de viabilidad para los huevos de nemátodos encontrados en los lodos y los productos biodegradados mostraron que los huevos determinados fueron no viables, es decir, que no se observaron larvas en su interior en un 100% de los casos. Para los lodos de la Zona cultural, posiblemente el tiempo de residencia mayor a 1 año en el sedimentador primario los hace inviables y, para el caso del Vivero Forestal de Coyoacán, es posible que algún agente oxidante haya estado en contacto con los lodos o que los cambios realizados por el personal del Sistema de Aguas provoque que estos huevos de helmintos sean inviables. Para el caso de las "compostas", a pesar de la aeración, al ser ya inviables, no pueden producir larvas. Con base en esto podría plantearse un estudio posterior que permitiera descartar problemas de helmintosis en las personas que manipularan estos materiales. Actualmente, la recomendación es que las personas que manipulan estos residuos usen sistemas de protección personal para garantizar su salud.

#### **4.1.3 Comparación de los tratamientos a la entrada y a la salida de la biodegradación ("composta")**

Para verificar si existieron diferencias entre las semanas 1 y la 22 se analizaron los resultados obtenidos con una prueba *t Student* para muestras pareadas antes y después del proceso de biodegradación (Tabla 4.5). Las hipótesis consideradas fueron:

$$H_0 ; M_D = 0 \text{ y } H_i ; M_D \neq 0$$

Cuando la *t* calculada es mayor de la *t* de tablas se rechaza la hipótesis nula, esto es, los resultados obtenidos indican que sí existen diferencias significativas entre los valores de entrada y de salida, considerando los intervalos de confianza de 95 y 99%. La ecuación para obtener la *t student* es la siguiente:

$$t_o = \frac{D - M_D}{S_d / \sqrt{n}}$$



donde:

H = Hipótesis

$M_D$  = Media de las hipótesis

D = Media de las diferencias

$S_d$  = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de reactores

Tabla 4.5 Estadísticos de prueba y probabilidades

Variable analizada	Origen del lodo primario	t*	Valor de t de tablas		Conclusión		
			$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$			
Peso	Zona Cultural	6.92	3.182	5.841	Se rechaza la hipótesis nula		
	Viveros de Coyoacán	11.68			Se rechaza la hipótesis nula		
Volumen	Zona Cultural	76.69			Se rechaza la hipótesis nula		
	Viveros de Coyoacán	33.31			Se rechaza la hipótesis nula		
Temperatura	Zona Cultural	12.12			Se rechaza la hipótesis nula		
	Viveros de Coyoacán	7.35			Se rechaza la hipótesis nula		
Humedad	Zona Cultural	16.94			Se rechaza la hipótesis nula		
	Viveros de Coyoacán	11.23			Se rechaza la hipótesis nula		
pH "composta"	Zona Cultural	16.94			3.182	5.841	Se rechaza la hipótesis nula
	Viveros de Coyoacán	15.36					Se rechaza la hipótesis nula
pH lixiviados	Zona Cultural	8.42			3.43	5.841	Se rechaza la hipótesis nula
	<b>Viveros de Coyoacán</b>	<b>3.43</b>					<b>Se acepta la hipótesis nula</b>
Relación C/N	Zona Cultural	8.30			3.43	5.841	Se rechaza la hipótesis nula
	Viveros de Coyoacán	8.80					Se rechaza la hipótesis nula
Coliformes fecales	Zona Cultural	116.60	3.43	5.841	Se rechaza la hipótesis nula		
	Viveros de Coyoacán	105.42			Se rechaza la hipótesis nula		
Huevos de helmintos	Zona Cultural	84.75	3.43	5.841	Se rechaza la hipótesis nula		
	Viveros de Coyoacán	13.09			Se rechaza la hipótesis nula		

Se puede concluir que sí existen diferencias significativas para  $\alpha=0.01$  y  $0.05$  entre los valores para la semana 1 y la semana 22 en todos los parámetros medidos, con excepción del pH de los lixiviados en los reactores de Viveros de Coyoacán, en donde el valor de la  $t^*$  calculada fue de 3.43 (menor al t de tablas de  $\alpha=0.05$  que es igual a 5.841), lo que indica que no existió diferencia significativa en el valor inicial y el último reportado. Sin embargo, se debe considerar que los lixiviados solamente se obtuvieron hasta la semana 7, por lo que no se considera importante el que no hayan cambiado significativamente los valores.



#### 4.1.4 Comparación de los parámetros entre los tratamientos de los dos distintos tipos de mezclas lodos:carrizos al inicio y al término de la biodegradación

Los valores de los parámetros más importantes medidos en los tratamientos de "composta" al inicio y al término de la biodegradación se tienen en las Tablas 4.6 y 4.7, los cuales se van a comparar entre sí con objeto de observar sus diferencias.

Tabla 4. 6 Comparación de los parámetros entre los tratamientos de los dos distintos tipos de mezclas a biodegradar (lodos:carrizo) al inicio de la biodegradación

	Relación 1:1		Diferencias significativas en relación 1:1	Relación 1:2		Diferencias significativas en relación 1:2
	Zona Cultural	Viveros		Zona Cultural	Viveros	
% de Humedad	81.99	77.12	No existe	81.73	78.38	No existe
% Ceniza	16.66	51.83	Sí existe	16.66	41.78	Sí existe
Relación C/N	20.33	18.53	No existe	18.30	20.89	No existe
Valor de pH	8.56	8.88	No existe	8.41	8.65	No existe

Tabla 4. 7 Comparación de los parámetros entre los tratamientos de los dos distintos tipos de mezclas lodos:carrizos al término de la biodegradación

	Relación 1:1		Diferencias significativas en relación 1:1	Relación 1:2		Diferencias significativas en relación 1:2
	Zona Cultural	Viveros		Zona Cultural	Viveros	
% de Humedad	78.11	67.88	Sí existe	78.27	68.95	No existe
% Ceniza	24.01	58.95	Sí existe	32.22	42.48	No existe
Relación C/N	10.65	13.28	No existe	10.12	13.82	No existe
Valor de pH	6.99	6.57	Sí existe	6.96	6.63	Sí existe
% de reducción de masa	35.70	37.72	No existe	32.89	42.16	No existe
% de reducción de volumen	79.17	68.33	Sí existe	81.67	75.00	No existe

Al realizar la comparación entre los tratamientos de los dos distintos tipos de mezclas lodos:carrizos al inicio de la biodegradación, se puede observar que solamente en el contenido de ceniza fue donde se tuvieron diferencias significativas y eso se puede explicar porque el contenido de cenizas mostrado en la caracterización de los lodos en la



Tabla 4.1, es mayor en los lodos provenientes del Vivero Forestal. Y al realizar la comparación entre los tratamientos de los dos distintos tipos de lodos al término de la biodegradación, se tiene que en la relación 1:1 hubo diferencias significativas en el contenido de humedad, en el contenido de cenizas, en los valores de pH y en el porcentaje de reducción de volumen. En cambio, en la relación 1:2, la significancia estuvo dada solamente por el valor de pH, ya que en los demás parámetros no se encontró diferencia significativa.

De los valores obtenidos de los tratamientos de un lodo a otro se observa que el contenido de humedad de los tratamientos de Zona Cultural fueron los más altos. Eso se debe a que la humedad al inicio de los tratamientos era superior a los tratamientos de Viveros de Coyoacán y se corrobora con el contenido de cenizas donde, los tratamientos que tenían mayor humedad tienen menor contenido de cenizas. También se puede observar respecto a la relación C/N que los tratamientos que tuvieron mayor estabilidad, es decir, un valor menor en esta relación, fueron los de Zona Cultural aún cuando los contenidos iniciales de C/N eran similares en los dos tratamientos de los distintos tipos de lodos.

Los porcentajes de reducción de masa y de volumen no se analizan en este inciso. Al inicio, los reactores fueron llenados con el mismo peso y, al final de la biodegradación, los datos obtenidos se analizan en el apartado correspondiente.

#### **4.1.5 Realización de pruebas toxicológicas en "composta" terminada**

Los resultados de la siembra de las 54 macetas, 27 con frijol y las otras 27 con maíz, regadas diariamente con agua desionizada por 28 días se presentan a continuación (Figura 4.6).

Los parámetros de evaluación fueron el número de plántulas emergentes (PE), la longitud del tallo (LT) y la longitud de la raíz (LR). En la evaluación de las plántulas emergentes se evaluaron 5 tratamientos, incluyendo los tratamientos adicionales de "composta" inicial y terminada, debido a que en la emergencia, las semillas no requieren nutrimentos sino de un ambiente adecuado; es decir, tener un sustrato idóneo y una cantidad suficiente de humedad.



Figura 4.6 Macetas sembradas con maíz y frijol con distintos tipos de tratamientos

Aquí se evaluaron posibles efectos de toxicidad y presencia de microorganismos que puedan dañar a la semilla provenientes de la "composta" y de los lodos y el material abultante. Los diferentes tratamientos fueron:

**Sustrato puro** (50% tierra negra+ 50% arena)

**Sustrato puro + "composta"( ZC o VV)** (40 T ha<sup>-1</sup>)

**Sustrato puro + lodo (ZC o VV)** (40 T ha<sup>-1</sup>)

**Composta (ZC o VV)** (40 T ha<sup>-1</sup>)

**Lodo (ZC o VV) + carrizos (1:1) (ZC o VV)** (40 T ha<sup>-1</sup>)

Para la LT (longitud de tallos) y la LR (longitud de raíces), se evaluaron con los tres primeros tratamientos para verificar con cual de ellos se obtiene mejor respuesta después de los 28 días del experimento.



Para el estudio de la variabilidad de la respuesta sobre emergencia (plántulas emergentes, PE) se utilizó un solo factor, el cual era el tipo de sustrato con los 5 niveles: sustrato puro, sustrato puro + lodos, sustrato puro + "compostas", la "composta" sola y el lodo crudo + carrizos.

El número de plantas de maíz y frijol que emergieron en cada reactor (macetas) fueron distintas para cada uno de los cinco tratamientos evaluados y para cada semilla. En los tratamientos en los que se utilizó el lodo de Zona Cultural, ya sea crudo o biodegradado, se observó que, tanto para el frijol como para el maíz, el tratamiento que dio los valores más altos resultado fue el que estaba conformado por sustrato puro + "composta", ya que emegieron 19 y 18 plántulas de las 20 semillas que se sembraron, respectivamente.

Para el maíz (Figura 4.7), el número de plántulas que emergieron no mostraron diferencias significativas entre tratamientos (entre 15 y 17). Al realizar el análisis de varianza para la emergencia de las semillas de maíz, se observó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con un  $F^*=1.87$  y una  $p=0.1932$  para un intervalo de confianza de 95%.

En las semillas de frijol (Figura 4.8), se observó que el tratamiento con lodo crudo y material abultante es el menos favorable, seguido del tratamiento con sustrato puro + lodo.

El tratamiento con "composta" (sin sustrato puro) y el tratamiento con sustrato puro dieron resultados similares (12 semillas germinadas), lo que significa que para el frijol estos dos tratamientos tienen el ambiente adecuado para su germinación y crecimiento. Es interesante observar que si la "composta" se utiliza como mejorador de suelos se obtienen resultados más favorables (18 semillas germinadas). Cuando se realizó el análisis de varianza de la variabilidad de la respuesta de las plantas emergentes de la semilla del frijol en los tratamientos con lodos de Zona Cultural, se observó que sí existen diferencias significativas entre todos los tratamientos con un  $F^*=16.07$  y una  $p=0.0002$ , en un intervalo de confianza del 95%.

Esto indicaría que las semillas de maíz son menos sensibles a su entorno que las de frijol (para el estudio con lodos del sedimentador primario de la Zona Cultural).



### PLANTAS EMERGENTES DE MAÍZ EN TRATAMIENTOS CON LODO DE ZONA CULTURAL

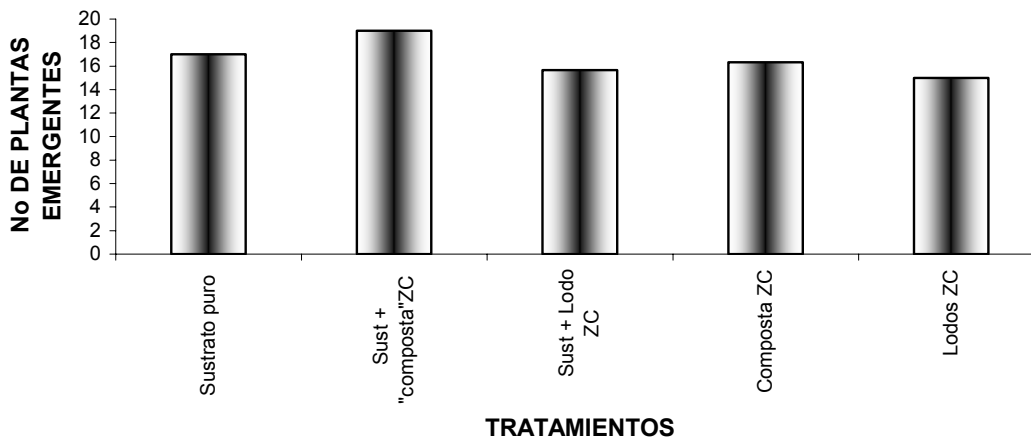


Figura 4.7 Resultado del número de plantas emergentes de maíz en los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural al término de la experimentación

### PLANTAS EMERGENTES DE FRIJOL EN TRATAMIENTOS CON LODO DE ZONA CULTURAL

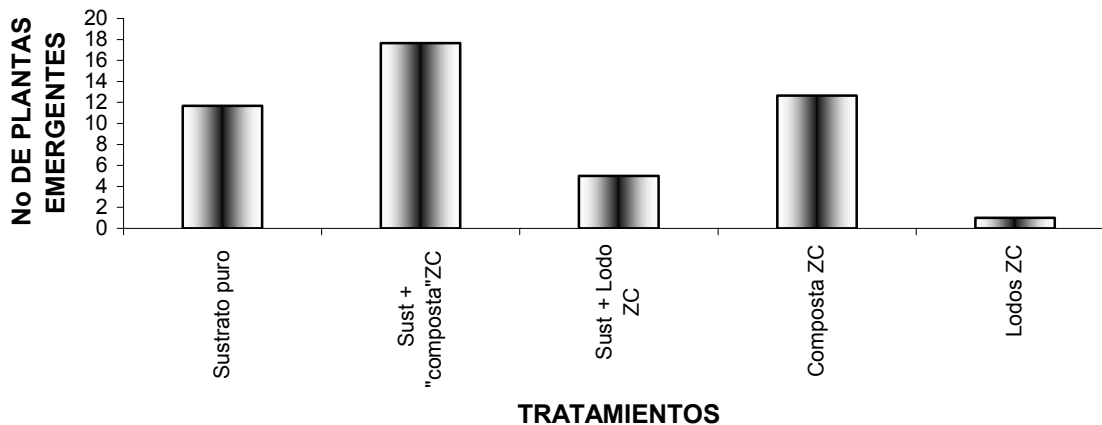


Figura 4.8 Resultado del número de plantas emergentes de maíz en los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural al término de la experimentación

En los tratamientos donde se utilizaron lodos del sedimentador de Viveros de Coyoacán, respecto del número de plantas de maíz que emergieron (Figura 4.9), se observó que los tratamientos que dieron mejor resultado fueron los que se realizaron con sustrato puro + "composta" y sustrato puro + lodo VV, estando por arriba del sustrato puro.



### PLANTAS EMERGENTES DE MAÍZ EN TRATAMIENTOS CON LODO DE VIVEROS

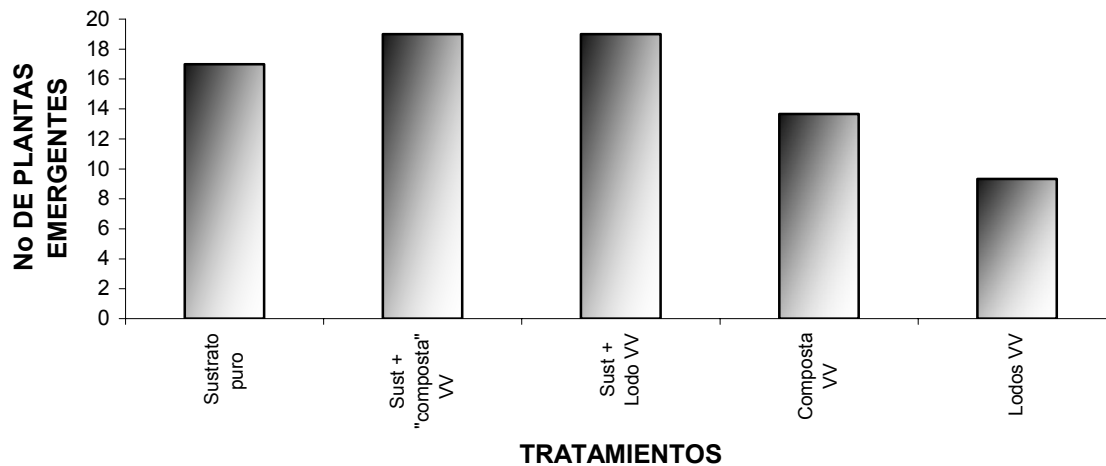


Figura 4.9 Resultado del número de plantas emergentes de maíz en los tratamientos utilizando lodo (crudo y como "composta") de Viveros de Coyoacán al término de la experimentación

El tratamiento más desfavorable fue en el que se utilizó el lodo crudo seguido del tratamiento de "composta", lo que indica que es necesario tener un sustrato para el crecimiento del maíz y agregarle algún mejorador, ya sea la "composta" o el lodo crudo. Sin embargo, para utilizar el lodo crudo sin ningún tratamiento previo debe cumplir con la normatividad vigente, lo que no ocurre en este caso. Cuando se realizó el análisis de varianza de la variabilidad de la respuesta de las plantas emergentes en los tratamientos con los lodos de Viveros de Coyoacán sembrados con semillas de maíz, se obtuvo un  $F^*=7.58$  y una  $p=0.0045$  lo que indica que sí existen diferencias significativas entre los tratamientos evaluados a un  $\alpha = 0.05$ .

Para las plántulas de frijol, en los tratamientos donde se utilizaron lodos del sedimentador de Viveros de Coyoacán, se observó que los tratamientos que dieron mejor resultado de emergencia (Figura 4.10), fueron los que utilizaron el sustrato puro + "composta", seguido por el que contenía el sustrato puro + lodo crudo, indicando mejores resultados que los que contenían el sustrato puro únicamente. Los peores tratamientos fueron los que contenían "composta" y los de lodo + carrizos, lo que puede indicar que en estos tratamientos era necesario que tuvieran un sustrato puro para que absorbiera el contenido de humedad y así evitar que las semillas llegaran a podrirse o a inhibirse su germinación.





### PLANTAS EMERGENTES DE FRIJOL EN TRATAMIENTOS CON LODO DE VIVEROS

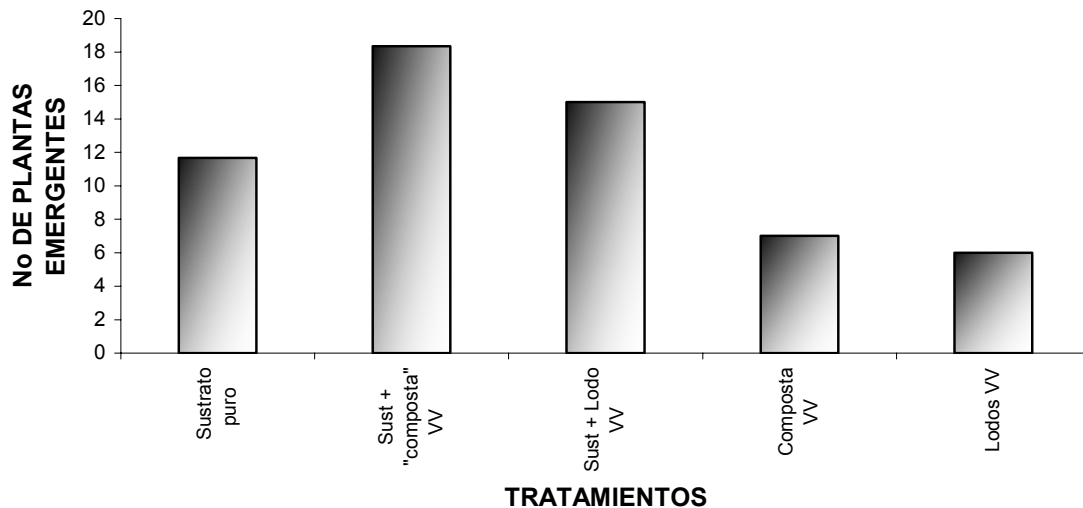


Figura 4.10 Resultado del número de plantas emergentes de frijol en los tratamientos utilizando lodos (crudo y como "composta") de Viveros de Coyoacán al término de la experimentación

Para el análisis de varianza de las semillas de frijol se obtuvo una  $F^*=6.06$  y una  $p=0.0096$  lo que también indica que sí existen diferencias significativas entre los tratamientos en un intervalo de confianza de 95%. Esto plantea la bondad de la "composta" como mejorador de suelos para ambos tipos de semillas, precisamente por su capacidad de retención de la humedad.

Para el estudio de la variabilidad de la respuesta sobre LT y LR se utilizó un solo factor, el cual era el tipo de sustrato con los 3 niveles o tratamientos: sustrato puro, sustrato puro + lodos y sustrato puro + "compostas".

Para los resultados obtenidos con respecto de las alturas alcanzadas por las plantas con los tres diferentes tratamientos, se observó que para los materiales provenientes de la Zona Cultural, el tratamiento con el que se obtuvieron mejores resultados respecto al maíz fueron los que contenían sustrato puro + "composta", seguido del sustrato puro + lodo ZC (Figura 4.11) y siendo el más desfavorable el sustrato puro. Esto puede indicar que añadirle un mejorador al suelo a utilizar es una opción viable para mejorar los cultivos de maíz. Cuando se realizó el análisis de varianza de las respuestas de la altura de las plantas de la semilla del maíz en los tratamientos con lodos y "composta" de la Zona



Cultural, se observó que sí existen diferencias significativas entre los tratamientos con un  $F^*=23.12$  y una  $p=0.0015$ , en un intervalo de confianza del 95%. Esto indica la bondad de su uso como mejorador.



Figura 4.11 Altura del tallo de las plantas de maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Zona Cultural

En los resultados correspondientes al frijol (Figura 4.12), se observó que los tratamientos con sustrato puro y sustrato puro + "composta" fueron similares, estando ligeramente más altas las plantas en las que el soporte era sustrato puro + lodo. Sin embargo, al realizar el análisis de varianza se encontró que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con un  $F^*=0.90$  y una  $p=0.4552$  para un intervalo de confianza de 95%.

En las plantas sembradas en los tratamientos que contenían lodo de Viveros de Coyoacán (Figura 4.13), se observó, respecto a las semillas de maíz, que el que contenía sustrato puro + "composta" tuvo alturas de tallo superiores a los otros dos tratamientos, siendo el más desfavorable el sustrato puro sin ningún agregado.

Cuando se realizó el análisis de varianza de la variabilidad de la respuesta de la altura de las plantas de la semilla del maíz en los tratamientos con lodos y "composta" de Viveros de Coyoacán, se observó que no existen diferencias significativas entre los tratamientos que se evaluaron, con un  $F^*=1.37$  y una  $p=0.3241$ , en un intervalo de confianza del 95%.



Con respecto a las alturas de los tallos alcanzadas por las semillas de frijol (Figura 4.14), se observó un comportamiento similar a las semillas de maíz siendo el mejor tratamiento el que contenía sustrato puro + "composta".

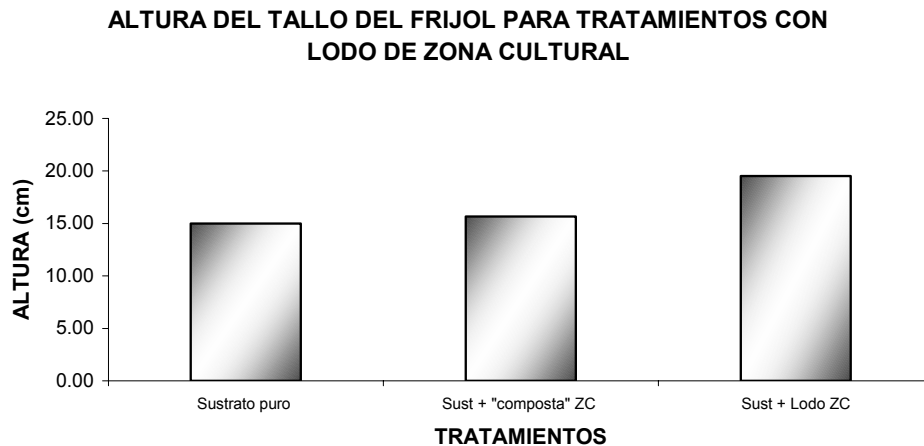


Figura 4.12 Altura del tallo de las plantas de frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Zona Cultural

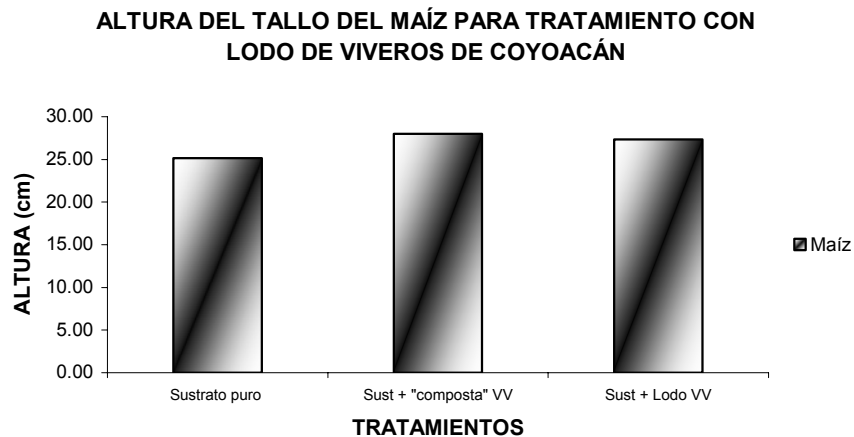


Figura 4.13 Altura del tallo de las plantas de maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Viveros de Coyoacán

Cuando se realiza el análisis de varianza para la variabilidad de la respuesta de las alturas de las plantas que emergieron de la semilla de frijol, se observó que tampoco existen diferencias significativas entre los tratamientos con un  $F^*=3.09$  y una  $p=0.1193$  para un intervalo de confianza de 95%.



#### ALTURA DEL TALLO DEL FRIJOL PARA TRATAMIENTO CON LODO DE VIVEROS DE COYOACÁN

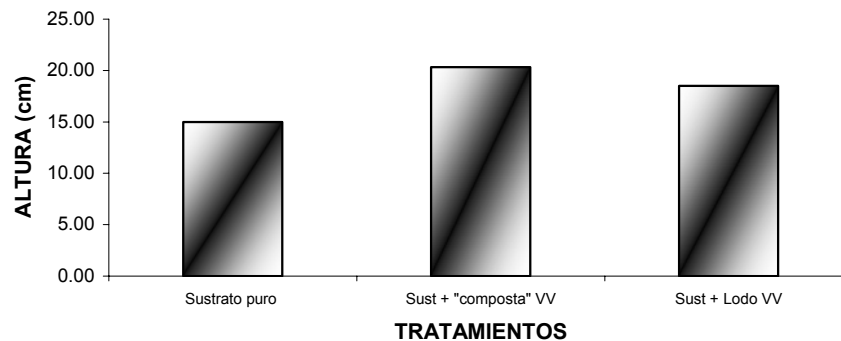


Figura 4.14 Altura del tallo de las plantas de frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodos de Viveros de Coyoacán

En los resultados obtenidos de la longitud de la raíz, LR, de las plantas de maíz con respecto a los tratamientos con lodos de Zona Cultural (Figura 4.15), las que tuvieron mayor longitud de sus raíces fueron las plantas que estaban en sustrato puro, sin agregarle ningún mejorador. Esto podría indicar que las raíces tuvieron necesidad de expandirse o crecer más para obtener sus requerimientos necesarios de nutrimentos (Ávila *et al*, 2003).

Al realizarse el análisis de varianza de la variabilidad de la respuesta de la longitud de las raíces de las plantas de la semilla del maíz en los tratamientos con lodos de Zona Cultural, se observó que si existen diferencias significativas entre el sustrato puro y las demás combinaciones con un  $F^*=14.36$  y una  $p=0.0052$ , en un intervalo de confianza del 95%.

Para el caso de las semillas de frijol (Figura 4.16), también se observó que las longitudes mayores eran las que estaban en el sustrato puro, seguidas de los tratamientos con sustrato puro + lodo y, por último, el sustrato puro + "composta", lo que estaría explicado por la suposición de que las longitudes de las raíces son consecuencia de la disponibilidad de los nutrimentos que requieren. Esto es, mientras menos disponibilidad tienen mayor es la longitud de las raíces para allegárselos.



### LONGITUD DE LA RAÍZ DEL MAÍZ DE LOS TRATAMIENTOS UTILIZANDO LODO DE ZONA CULTURAL

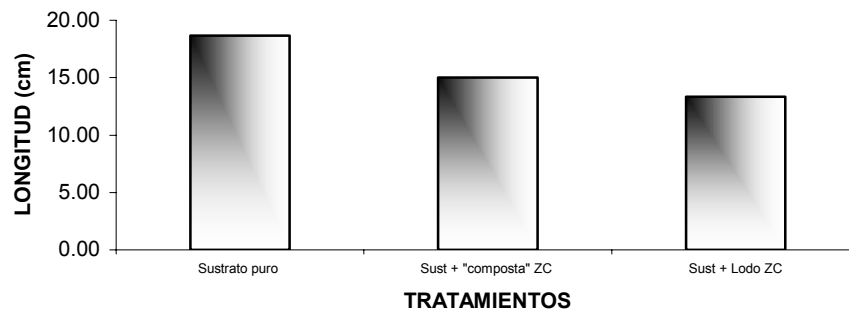


Figura 4.15 Longitud de la raíz de las plantas del maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural

### LONGITUD DE LA RAÍZ DEL FRIJOL DE LOS TRATAMIENTOS UTILIZANDO LODO DE ZONA CULTURAL

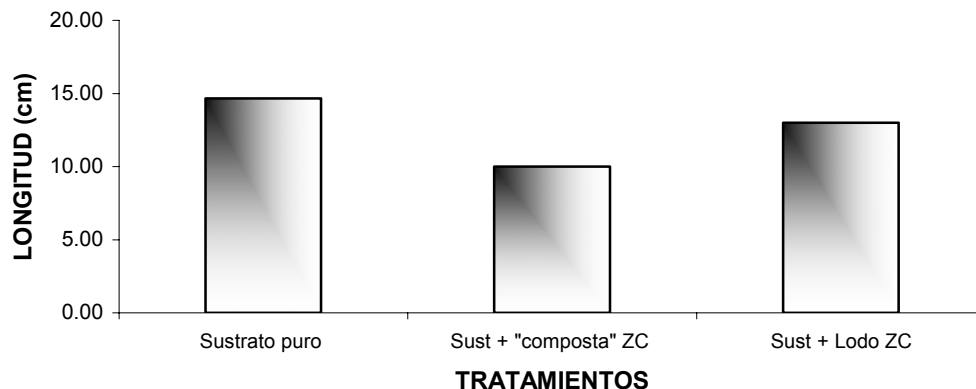


Figura 4.16 Longitud de la raíz de las plantas del frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Zona Cultural

Cuando se realizó el análisis de varianza para la semilla de frijol, con respecto de la respuesta de la longitud de las raíces de las plantas que emergieron, se observó que también existen diferencias significativas entre los tratamientos con un  $F^*=6.04$  y una  $p=0.0365$  para un intervalo de confianza de 95%. Una mayor longitud en la raíz principal implica, por una parte, mayor volumen de exploración en el suelo para la búsqueda de agua y nutrimentos y, por otra, un mayor anclaje (Ávila *et al*, 2003).



Esto indicaría que la adición de otros componentes al sustrato puro haría las raíces menos grandes (pudiendo la planta obtener los mismos nutrimentos con menos "gasto energético"). Para las longitudes de la raíz de las semillas de maíz (Figura 4.17), los tratamientos con lodos y "composta" de Viveros de Coyoacán, se observó que, al igual que con los lodos y "composta" de Zona Cultural, las mayores longitudes de raíces, tanto para las plántulas de maíz como para las de frijol, fueron los reactores con sustrato puro únicamente. Sin embargo al realizar el análisis de varianza para los experimentos con maíz no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos que se evaluaron, obteniéndose una  $F^*=4.29$  y una  $p=0.0697$ , en un intervalo de confianza del 95%.



Figura 4.17 Longitud de la raíz de las plantas del maíz de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Viveros de Coyoacán

En los reactores sembrados con semillas de frijol (Figura 4.18), se encontró que los otros dos tratamientos tenían valores iguales lo que puede indicar que tenían suficientes nutrimentos en el sustrato para que las raíces no tuvieran que crecer más de lo necesario.

Cuando se realiza el análisis de varianza para la semilla de frijol, para la respuesta de la longitud de las raíces de las plantas que emergieron se observó que sí existen diferencias significativas entre los tratamientos con un  $F^*=7.68$  y una  $p=0.0222$  para un intervalo de confianza de 95%, lo que puede indicar que las raíces se alargaron para tener mejor disponibilidad de los nutrimentos en el sustrato puro, por lo que se recomienda utilizar un mejorador de suelos para que la energía de la planta se concentre en el crecimiento y desarrollo de su morfología y no en la búsqueda de sus requerimientos.



**LONGITUD DE LA RAÍZ DE FRIJOL DE LOS TRATAMIENTOS  
 UTILIZANDO LODOS DE VIVEROS DE COYOACAN**

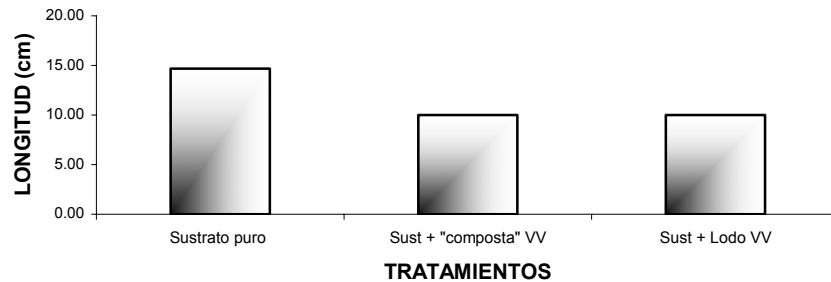


Figura 4.18 Longitud de la raíz de las plantas del frijol de los tratamientos utilizando "composta" y lodo de Viveros de Coyoacán

**4.2 Estimación de la cantidad de subproductos (lodos) en los humedales en estudio**

Según la literatura (Metcalf y Eddy, 2003), se tiene una acumulación de lodos en cualquier sedimentador primario de aguas residuales municipales de:

$$0.15 \text{ kg lodos secos/ m}^3$$

Por lo tanto, para obtener la cantidad de lodos secos producidos en los sedimentadores de los dos humedales artificiales en estudio, se tiene:

$$0.15 \frac{\text{kg lodos secos}}{\text{m}^3} \times 5.37 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 0.8 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \times 182.5 \frac{\text{d}}{\text{semestre}} = \mathbf{147 \text{ kg lodos secos semestre}}$$

Para la Zona Cultural se procesan (Rodríguez y Varela, 2003) por lo que:

$$0.15 \frac{\text{kg lodos secos}}{\text{m}^3} \times 0.4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 0.06 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \times 182.5 \frac{\text{d}}{\text{semestre}} = \mathbf{10.95 \text{ kg lodos secos semestre}}$$

Si se considera el % de humedad de los lodos del sedimentador primario de la planta de la Zona Cultural y del de los Viveros de Coyoacán, determinados en esta investigación, para obtener la cantidad de lodo húmedo generado se tiene:

$$\% \text{ Humedad Zona Cultural} = 99.12 \%$$

$$\% \text{ Humedad Viveros de Coyoacán} = 78.16 \%$$



En la Tabla 4.8 se presenta la información determinada en esta investigación y estimada para tener el total de lodos generados por semestre.

Para calcular el área necesaria para hacer las pilas de "composta" en cada sistema de humedales artificiales se debe considerar el volumen total de lodo generado semestralmente.

Tabla 4.8 Masa de lodos generada, en kg (cada semestre)

ZONA CULTURAL		VIVEROS	
LODO SECO (kg/semestre)	LODO HÚMEDO (kg/semestre)	LODO SECO (kg/semestre)	LODO HÚMEDO (kg/semestre)
10.95	<b>1244.31</b>	147	<b>673</b>

Para obtener las proporciones adecuadas de lodo y carrizo al inicio de la "composta" con un contenido de humedad óptimo se realiza lo siguiente:

Se tienen las cantidades de lodo generadas por el sistema. Entonces, como se vio en la experimentación que la proporción 1:1 puede ser adecuada (ya que no hay diferencia significativa entre las dos proporciones estudiadas), se mezcla con la misma cantidad en peso del material abultante, es decir el carrizo. Se propone un porcentaje de humedad óptimo de entrada (lo que se quiere obtener es el contenido de humedad del carrizo para que la mezcla tenga el contenido de humedad propuesto). El porcentaje óptimo de humedad de la mezcla es de 60%.

#### ■ Proporciones adecuadas para la "composta" de Viveros de Coyoacán

A continuación se mencionan las masas iniciales propuestas de lodo y carrizo, así como su porcentaje de humedad y sólidos totales iniciales. En la mezcla se propone un porcentaje óptimo de humedad de 60% (Maynard, 2000; Negro *et al*, 2000):

	Masa, kg	% Humedad	% ST
Lodo	673	78.12	21.88
Carrizo	673	70.45	29.55
Mezcla	1346	<b>60</b>	<b>40</b>





Con la siguiente fórmula se obtiene el porcentaje de sólidos totales del carrizo necesario para que la mezcla tenga el valor propuesto:

$$P_{\text{MEZCLA}} \times \% \text{ ST}_{\text{MEZCLA}} = P_{\text{CARRIZO}} \times \% \text{ ST}_{\text{CARRIZO}} + P_{\text{LODO}} \times \% \text{ ST}_{\text{LODO}}$$

Despejando el % de ST del carrizo y sustituyendo los valores se obtiene:

$$\% \text{ ST}_{\text{CARRIZO}} \text{ necesarios} = 0.58$$

Y, aplicando la fórmula para calcular la masa del carrizo (Negro *et al*, 2000):

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Masa del agua}_{\text{CARRIZO}} \times \text{Masa}_{\text{CARRIZO}} + \text{Masa del agua}_{\text{LODO}} \times \text{Masa}_{\text{LODO}}}{\text{Masa}_{\text{CARRIZO}} + \text{Masa}_{\text{LODO}}}$$

1 kg carrizo contiene:

Contenido de humedad: 42 %  
Masa de agua: 0.40 kg  
Masa de materia seca: 0.60 kg

1 kg lodo VV contiene:

Contenido de humedad: 78.12 %  
Masa de agua: 0.78 kg  
Masa de materia seca: 0.22 kg

% de humedad deseado  
de la mezcla: 60

Despejando la masa del carrizo y sustituyendo valores se obtiene que, para 1 kg de lodo, se necesita:

$$\text{Cantidad de carrizo} = 1 \text{ kg}$$

manteniendo la proporción 1:1 lodo-carrizo, cuando se adiciona el carrizo secado al sol (sin problemas sanitarios) hasta alcanzar un porcentaje de humedad del 42%.

Para obtener las dimensiones de las pilas de "composta" se calcula el volumen necesario de la siguiente manera:

La densidad aparente del carrizo es de 0.157 ton/m<sup>3</sup>, la cual se obtuvo considerando que 3 kg ocupan 0.0191 m<sup>3</sup>, por lo que el volumen que ocupa el carrizo es de 4.3 m<sup>3</sup> y considerando la densidad aparente del lodo igual a 1 ton/m<sup>3</sup> (la del agua), se requieren



0.673 m<sup>3</sup>. Sumando los volúmenes obtenidos del lodo y el carrizo se necesitan 5 m<sup>3</sup>. Se da un margen de seguridad del 50% para la realización de las labores de mezclado, entonces el volumen que se requiere es de 7.5 m<sup>3</sup> (Figura 4.19). Las dimensiones propuestas para una pila de "composta" cuadrada son:

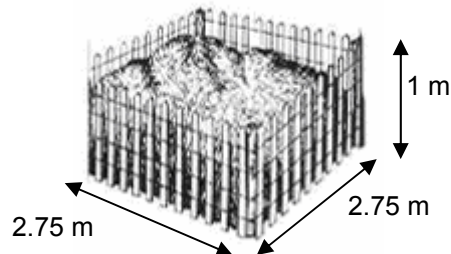


Figura 4.19 Dimensiones de una pila de "composta" cuadrada

Los balances de masa son los siguientes (Ramírez-Camperos, 2006):

	Masa kg	% Humedad	% ST	Masa seca, kg	% cenizas	% sólidos volátiles	SV <sub>bio</sub> kg	Agua
Lodo	673	78.12	21.88	147.25	75.01	24.99	18.39	525.74
Carrizo	673	42	58	198.87	7.71	92.29	110.12	282.66
Mezcla	1346	41	59	346.12	-	-	128.52	808.41
"Composta" terminada	362.6	40	60	217.60	-	-	-	145.06

Agua evaporada durante la biodegradación ("composta") = 808.41-145.06 = 663.34 kg

Cálculo de sólidos volátiles biodegradables:

Biodegradabilidad del lodo= 50%

Biodegradabilidad del carrizo= 60%

$$SV_{\text{biodegradables}} = \% \text{Biodegradabilidad} \times \% \text{SV} \times \text{Masa seca}$$

$$SV_{\text{lodo}} = 0.50 \times 0.2499 \times 147.25 = 18.39 \text{ kg}$$

$$SV_{\text{carrizo}} = 0.60 \times 0.9229 \times 198.87 = 110.12 \text{ kg}$$

Cantidad de "composta" terminada en base seca = 217.60 kg

Cantidad de "composta" con 60% de sólidos = 362.67 kg



Cantidad de agua en la "composta" = 145.06 kg

### ■ Proporciones adecuadas para la "composta" de Zona Cultural

Para obtener las proporciones adecuadas de la pila de "composta" de Zona Cultural se necesita tener una mezcla inicial con un porcentaje de humedad óptimo. Sin embargo la humedad de los lodos de Zona Cultural es muy elevada, 99%, ya que los lodos que se "atrapan" en este segundo sedimentador primario son solamente los que alcanzan a "escapar" de la fosa séptica ubicada aguas arriba (Figura 3.2c), por lo que primeramente se deberían secar los lodos para ajustar su contenido de humedad a 80%.

Una de las opciones para desaguar los lodos es instalar un lecho de secado. Sin embargo se debe tener un excesivo cuidado en la construcción y operación de estos sistemas, cabe mencionar que en países de economías estables ya no se encuentran estos sistemas por el peligro que representan para la salud pública. En el Anexo 7 se presenta un cálculo teórico de un lecho de secado (aún cuando se reitera la no recomendación de su instalación).

Al momento de secar el compuesto abultante, que es el que no genera problemas de salud, el contenido de humedad óptima de la mezcla debe llegar a 60%. Al realizar los cálculos, la producción de carrizo es insuficiente para compensar el elevado contenido de humedad de los lodos que se generan en el segundo sedimentador primario. Como este sistema se encuentra ubicado junto a la plancha de "composta" de Ciudad Universitaria, es posible tomar parte del material de las áreas verdes de la Ciudad Universitaria para completar el contenido de material abultante. Por otro lado, cuando se utiliza el equipo "vactor" que posee la Dirección General de Conservación de la UNAM para desazolver la fosa séptica, esos lodos pueden estabilizarse en la propia planta de "composta" de la UNAM en vez de verterlos a los drenajes de la Ciudad de México.

A continuación se mencionan las masas iniciales propuestas de lodo y carrizo, así como su porcentaje de humedad y sólidos totales iniciales. En la mezcla se propone un porcentaje de humedad de 60%.



	Cantidad	% Humedad	% ST
Lodo*	1244.31	80	20
Carrizo	1244.31	70.45	29.55
Mezcla	2488.62	<b>60</b>	<b>40</b>

\*Tomando el lodo desazolvado de la fosa séptica

Con la siguiente fórmula se obtiene el porcentaje de sólidos totales del carrizo necesario para que la mezcla tenga el valor propuesto:

$$M_{\text{MEZCLA}} \times \% \text{ ST}_{\text{MEZCLA}} = M_{\text{CARRIZO}} \times \% \text{ ST}_{\text{CARRIZO}} + M_{\text{LODO}} \times \% \text{ ST}_{\text{LODO}}$$

donde M es la masa de cada componente.

Despejando el % de ST del carrizo y sustituyendo los valores se obtiene:

$$\% \text{ ST}_{\text{CARRIZO}} \text{ necesarios} = 0.60$$

Y ahora, aplicando la fórmula (Negro *et al.*, 2000) para calcular la masa de carrizo:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Masa del agua}_{\text{CARRIZO}} \times \text{Masa}_{\text{CARRIZO}} + \text{Masa de agua}_{\text{LODO}} \times \text{Masa}_{\text{LODO}}}{\text{Masa}_{\text{CARRIZO}} + \text{Masa}_{\text{LODO}}}$$

1 kg carrizo contiene:

Contenido de humedad: 40 %  
 Masa de agua: 0.40 kg  
 Masa de materia seca: 0.60 kg

1 kg lodo VV contiene:

Contenido de humedad: 80 %  
 Masa de agua: 0.80 kg  
 Masa de materia seca: 0.20 kg

% de humedad deseado  
 de la mezcla: 60

Despejando la masa de carrizo y sustituyendo valores se obtiene que para 1 kg de lodo se necesita:

$$\text{Cantidad de carrizo} = 1 \text{ kg}$$

Por lo tanto se mantiene la proporción 1:1 lodo-carrizo.



Para obtener las dimensiones de las pilas de "composta" se calcula el volumen necesario de la siguiente manera:

La densidad aparente del carrizo es de  $0.157 \text{ ton/m}^3$ , entonces el volumen que ocupa el carrizo es de  $8 \text{ m}^3$  y considerando la densidad aparente del lodo igual a  $1 \text{ ton/m}^3$  se requieren  $1.244 \text{ m}^3$ . Sumando los volúmenes obtenidos del lodo y el carrizo se necesitan  $9.244 \text{ m}^3$ . Se da un margen de seguridad del 50% para la realización de las labores de mezclado, entonces se requiere un volumen de  $13.86 \text{ m}^3$  (Figura 4.20). Las dimensiones propuestas para una pila de "composta" cilíndrica pueden de 3 m de diámetro y 2 m de altura, aunque también se pueden hacer dos pilas con las siguientes dimensiones:

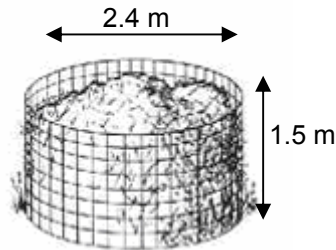


Figura 4.20 Dimensiones de una pila de "composta" cilíndrica

Los balances de masa son los siguientes (Ramírez-Camperos, 2006):

	Masa, kg	% Humedad	% ST	Masa seca, kg	% cenizas	% sólidos volátiles	SV <sub>bio</sub> kg	Agua kg
Lodo	1244.33	80	20	248.86	60.57	39.43	49.06	995.46
Carrizo	1244.33	40	60	198.87	7.710	92.29	110.12	497.73
Mezcla	2488.66	60	40	447.74			159.19	1493.19
"Composta" "terminada"	510.86	40	60	288.55			-	192.36

Agua evaporada durante la biodegradación ("composta") =  $1493.19 - 192.36 = 1300 \text{ kg}$

Cálculo de sólidos volátiles biodegradables:

Biodegradabilidad del lodo= 50%

Biodegradabilidad del carrizo= 60%

$$SV_{\text{biodegradables}} = \% \text{Biodegradabilidad} \times \% \text{SV} \times \text{Masa seca}$$



$$SVb_{\text{lodo}} = 0.50 \times 0.3943 \times 248.86 = 49.06 \text{ kg}$$

$$SVb_{\text{carrizo}} = 0.60 \times 0.9229 \times 198.87 = 110.12 \text{ kg}$$

Cantidad de "composta" terminada en base seca = 288.55 kg

Cantidad de "composta" con 60% de sólidos = 510.86 kg

Cantidad de agua en la "composta" = 192.36 kg

En las Figuras 4.21 y 4.22 se presentan las posibles ubicaciones de las pilas de "composta" en los dos diferentes humedales, las cuales operarían una vez por semestre y el material estabilizado podría usarse para mejorar el suelo, para los Viveros de Coyoacán, en las zonas arboladas y en la Zona Cultural para el espacio forestal de la Ciudad Universitaria de la UNAM.

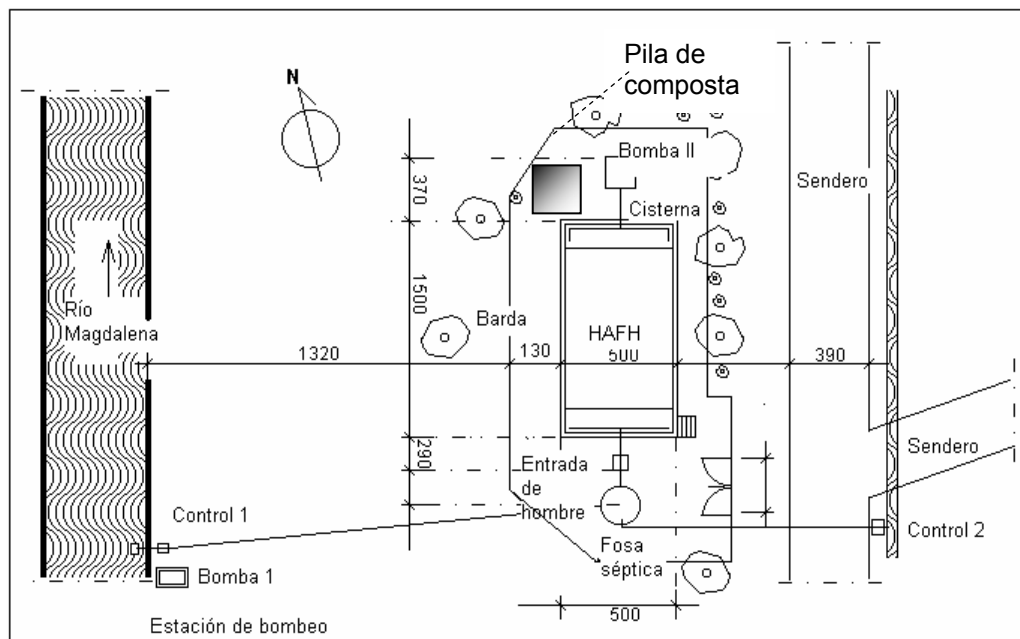


Figura 4.21. Ubicación de la pila de "composta" en el humedal artificial de flujo horizontal (Viveros de Coyoacán)

### 4.3 Discusión final

En esta investigación, lo que se buscaba era corroborar el potencial de realizar la estabilización de lodos sin desaguar incrementando la proporción de material abultante con objeto de mejorar las condiciones de biodegradación ("composta"). Para ello, se probaron las proporciones 1:1 y 1:2 de lodo y material abultante. No se encontraron diferencias significativas entre ellos (para cada uno de los sistemas en estudio). Por esta razón, cuando se dan las recomendaciones para construir los reactores de "composta", se usa la proporción 1:1, que es con la que puede emplearse una mayor cantidad de lodos primarios, ya que es la parte "peligrosa" (los tallos y material foliar no representan ningún problema).

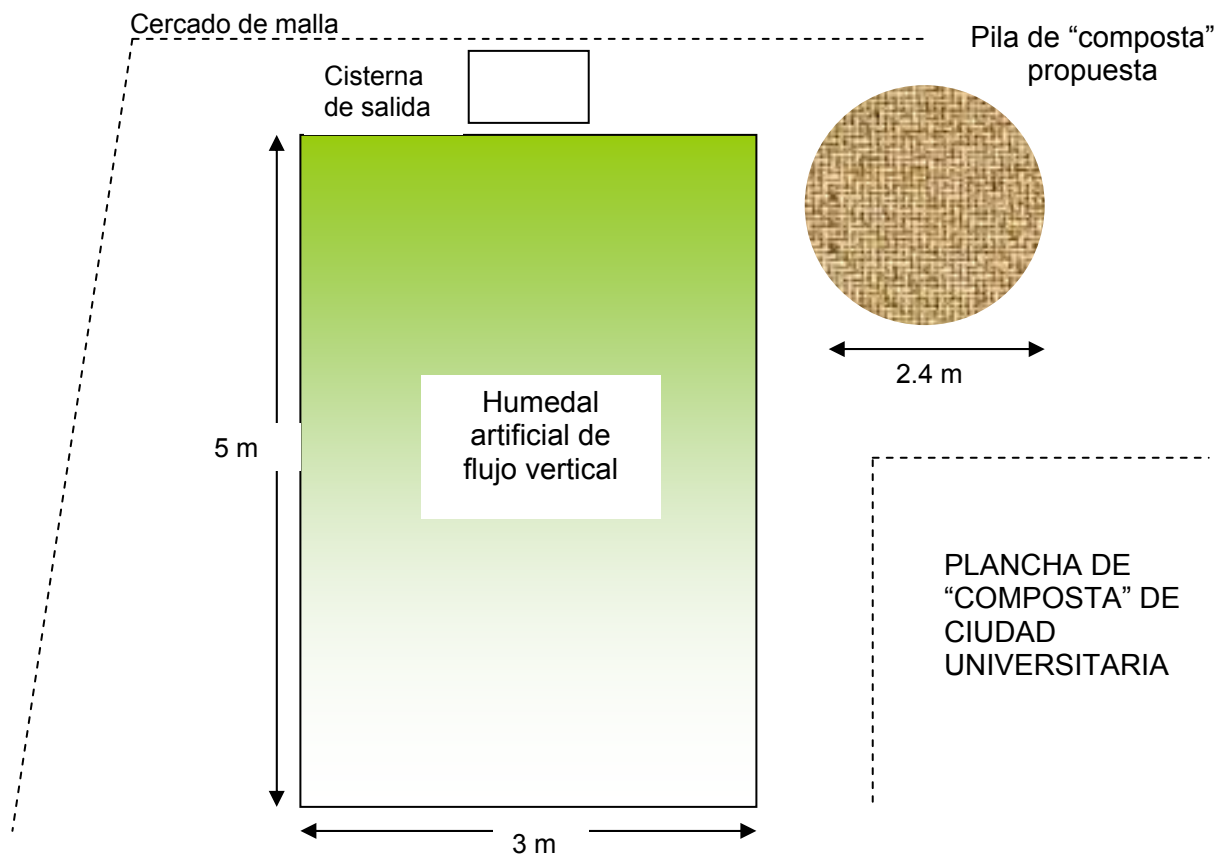


Figura 4.22 Ubicación de la pila de "composta" en el humedal artificial de flujo vertical (Zona Cultural, UNAM)

Por otro lado, la biodegradación reduce la masa global de los materiales y su volumen haciendo que el problema de su disposición controlada sea bastante menor. La disminución en el peso y volumen de las masas a estabilizar en los reactores fueron



claras, tanto para los lodos de Zona Cultural como para los del Viveros Forestal de Coyoacán, lo que indica que, aunque no se hayan alcanzado las temperaturas de pasteurización, sí existió una degradación de la materia orgánica y su transformación a gases, así como una evaporación pequeña pero adecuada de agua. Esto se corroboró con los resultados obtenidos de las relaciones C/N porque hubo una disminución del contenido de carbono que se transformó a gases.

La razón de no desear espesar o secar los lodos obedece al hecho de que, donde se utilizan sistemas de bajo costo como los lechos de secado solar, se debe tener un cuidado extremo en las condiciones de construcción y operación de estos sistemas, ya que las personas de las comunidades, donde pueden ser susceptibles de utilizarse, deben ser alejadas de estas zonas y estos sistemas tienen que ubicarse en áreas en las que los vientos no transporten las partículas hacia las zonas habitadas para evitar posibles problemas sanitarios y poner como seguridad un cercado de arbustos o árboles altos que eviten su dispersión y el acceso de las personas ajenas.

El periodo de estabilización del reactor secuencial anaerobio-aerobio fue de 22 semanas cuando los parámetros de medición se encontraban estabilizados, es decir que no variaban  $\pm 10\%$  del último valor medido. El perfil de temperaturas en las "compostas" indica que sí existió un aumento de las temperaturas. Sin embargo, la aireación proporcionada con respecto al volumen de "composta" no permitió generar el calor de reacción suficiente para alcanzar y mantener las temperaturas deseables en los reactores. Para la eliminación de microorganismos patógenos, en el caso de los coliformes fecales se redujeron solamente dos "logs" y en el caso de los huevos de helmintos se redujeron entre 46 y 70%, sobrepasando la normativa vigente. Sin embargo, al realizar la prueba de viabilidad de los huevos de nemátodos (los únicos helmintos identificados en todas las muestras), no se encontraron larvas, lo que indica que no eran viables y, por ende, se cumpliría con la normativa que exige que sean viables. Se mencionó que las pruebas de biodegradación se realizaron en un cuarto de temperatura controlada "hermético", lo que dificultó el suministro de oxígeno a los sistemas. Es obvio que, en un sistema abierto, esto no será una limitante y que, muy probablemente, la eliminación de organismos potencialmente patógenos sea mayor. La siguiente etapa de esta investigación debiera ser, por tanto, la realización de experimentos con celdas abiertas para corroborar esta suposición, verificando las proporciones aireación:volumen.





## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Considerando el objetivo de esta investigación de evaluar la estabilización de residuos primarios de dos humedales artificiales diferentes con material abultante, constituido por recortes de hidrofitas en reactores de "composta" con aeración intermitente, a escala de laboratorio, por medio de estudios toxicológicos empleando semillas de plantas comestibles, maíz y frijol, se puede concluir lo siguiente:

En las pruebas ecotoxicológicas realizadas con la siembra de las semillas de maíz y frijol, utilizando como sustratos los materiales producto de la biodegradación con un sustrato puro se concluye que, para el parámetro de las plantas emergentes, el mejor tratamiento fue el que se realizó con sustrato puro + "composta", tanto para las semillas de maíz como para las de frijol, en los dos distintos tipos de lodos. Esto se puede deber a la cantidad de humedad ocluida en las compostas que permite un mejor desarrollo radicular y que emerjan las plántulas.

Con respecto a las alturas alcanzadas por las plántulas de ambas semillas, los tratamientos que dieron mejores resultados para los lodos de Zona Cultural y del Vivero Forestal, fueron los de sustrato puro + "composta" y sustrato puro + lodos. Esto indica que se puede recomendar la utilización de las dos "compostas" como mejoradores de suelos. Para la posible utilización del lodo crudo se debe cumplir con la normatividad vigente, por lo que se recomienda estabilizar estos lodos por medio de la biodegradación aerobia ("composta"), como una garantía para la preservación de la salud.

Para las longitudes de las raíces en todos los tratamientos y en las dos diferentes semillas se encontró que se obtenían las raíces más largas en los reactores con sustrato puro, lo cual puede deberse a que la disponibilidad de nutrimentos es menor y por eso estas raíces tienden a expandirse para cubrir sus necesidades, lo que ocasiona que parte de su energía de crecimiento la utilicen en las raíces y no en su morfología.



Tomando en cuenta los resultados anteriores, puede considerarse que sí se alcanzó el objetivo de estabilizar los residuos de los sedimentadores primarios de los dos humedales artificiales en estudio, empleando como material abultante los recortes de hidrofitas en reactores de "composta" con aeración intermitente, a escala de laboratorio. La "composta" producida puede ser una alternativa viable de remediación y una opción como mejorador de suelos, si se corrobora fehacientemente que los HH son 100% inviables, ya que ambas plantas (maíz y frijol) se desarrollaron adecuadamente con las mezclas de sustrato puro y "composta".

## **5.2 Recomendaciones**

Para dar continuidad a esta investigación, se recomienda que se construyan los dos reactores de "composta" en la Zona Cultural y en los Viveros de Coyoacán como se observa en el capítulo 4 y con base en este estudio se dé una solución a las limitaciones que se encontraron en estos estudios (contenido de humedad, aumento de temperatura y, por consecuencia, la inactivación de microorganismos patógenos).



# ANEXOS



## **ANEXO 1**

### **METODOLOGÍAS ANALÍTICAS EMPLEADAS (Muestreo, transportación y conservación)**

#### **A1. MÉTODOS DE MUESTREO DE LODOS Y BIOSÓLIDOS, NOM-004 (DOF, 2002)**

Consiste en obtener una porción del volumen generado, la cual debe conservar la integridad de todos sus constituyentes desde el momento en que es tomada la muestra (parte representativa de un universo o población finita obtenida para conocer sus características) y hasta el final de su análisis o determinación en el laboratorio. El tiempo en que éstas permanecen estables dependerá de sus características y método de preservación utilizado. El muestreo constituye una parte integral y fundamental para evaluar la calidad de los lodos y biosólidos, para su depósito final.

El tamaño y número de muestras dependen de las fuentes generadoras, así como de los procesos utilizados para su estabilización. Es importante considerar la selección del sitio de muestreo, la homogeneidad y representatividad de la muestra, el grado de degradación, el volumen, tipo de análisis y la accesibilidad al sitio seleccionado para el muestreo.

#### **1 Equipo y materiales**

Sólo se relacionan los equipos y materiales que son de relevancia para el presente método.

##### **1.1 Equipo.**

**1.1.1** Báscula con capacidad mínima de 100 kg y precisión de 10 g.

**1.1.2** Báscula con capacidad mínima de 10 kg y precisión de 1 g.

##### **1.2 Materiales.**

###### **1.2.1** Bieldos.

**1.2.2** Bolsas de polietileno de 0.70 m x 0.50 m y calibre mínimo del No. 200.

**1.2.3** Bolsas de polietileno de 1.10 m x 0.90 m y calibre mínimo del No. 200.

**1.2.4** Botas de hule.

**1.2.5** Brocha de tamaño adecuado para la limpieza.

**1.2.6** Cascos de seguridad.

**1.2.7** Escobas.

**1.2.8** Guantes de carnaza.

**1.2.9** Ligas de hule de 1.5 mm de ancho.

**1.2.10** Marcadores de tinta permanente, preferentemente color negro.

**1.2.11** Mascarillas protectoras.

**1.2.12** Overoles.

**1.2.13** Papelería y varios (formatos de muestreo, lápices, gomas y otros).

**1.2.14** Papelería y varios (informe de campo, marcadores, ligas, etc.).

**1.2.15** Palas curvas.

**1.2.16** Recogedores.



**1.2.17** Tablas de inventario, tamaño carta u oficio.

**1.2.18** Tambos metálicos de forma cilíndrica, con capacidad de 20 L (Figura A1.1).

## **1.2. Tipos de lodos**

Muestras líquidas o semisólidas

Colectar la muestra directamente del vertedor en un recipiente de plástico de 20 L, hasta obtener el doble del volumen por utilizar para cada uno de los análisis por realizar, como mínimo.

### **1.2.1 Tuberías**

Colectar la muestra directamente de la tubería a través del grifo de purga que presente un diámetro interno mínimo de 3.8 cm.

### **1.2.2 Canales**

Colectar la muestra en el vertedor o en otro punto donde el lodo esté bien mezclado.

### **1.2.3 Digestores**

Colectar la muestra de un tanque mezclado que es alimentado a través de líneas provenientes de diferentes niveles en el digestor. Antes del muestreo asegurarse de eliminar el lodo acumulado previamente en las líneas.

### **1.2.4 Tanques**

Mezclar completamente el tanque y colectar varias muestras a diferentes profundidades y puntos. Juntar todas las muestras en una sola antes de realizar el análisis.

### **1.2.5 Lodos de sitios específicos en plantas de tratamiento**

Los siguientes puntos de muestreo se recomiendan para el muestreo de lodo en plantas de tratamiento de agua residual.

### **1.2.6 Lodo primario**

Conducir el lodo desde el tanque de estabilización hasta el cárcamo antes del bombeo, mezclar perfectamente y colectar una muestra representativa en este punto. Alternativamente colectar muestras de la bomba de lodos y de las tuberías, cercanas a éstas.

### **1.2.7 Lodo activado**

Colectar muestras en:

- a) cárcamo de bombeo
- b) de la bomba o tubería adyacente
- c) del punto de descarga de los lodos de retorno al afluente primario

El punto de muestreo se debe localizar en una región de buena agitación para la suspensión de sólidos.



#### **1.2.8 Lodo digerido**

Colectar muestras en la tubería de descarga del digestor al equipo o lechos de secado.

#### **1.2.9 Lodos del lecho de secado**

Colectar muestras del mismo tamaño en diferentes puntos del lecho sin incluir arena. Mezclar totalmente.

#### **1.2.10 Lodo filtrado**

Colectar porciones del mismo tamaño (utilizar cortadores de galletas) en la descarga del filtro.

#### **1.2.11 Azolves**

Para el caso de los azolves, aplica cuando ha sido extraída una muestra representativa de la zona donde se encuentran depositados.

##### **Muestras sólidas**

Para conformar las muestras se usa el método del cuarteo. Para eso:

Se toman de 4 a 8 bolsas de polietileno de 0.70 m x 0.50 m o 1.10 m x 0.90 m, se selecciona al azar el mismo número de sitios diferentes. Posteriormente, se llena cada una de las bolsas con el material de cada sitio y se trasladan a un área plana horizontal de aproximadamente 4 m x 4 m, preferentemente de cemento pulido o similar y bajo techo y se deposita su contenido en montículo.

Traspalear el material con pala o bieldo, para obtener una mezcla homogénea. A continuación, dividir en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D y eliminar las partes opuestas A y C o B y D. Repetir esta operación hasta dejar 10 kg aproximadamente de lodo o biosólido. La pila resultante sirve para determinar en el laboratorio el contenido de coliformes fecales, *Salmonella* ssp., huevos de helmintos, contenido de sólidos totales y sólidos volátiles, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc.

Trasladar la muestra al laboratorio en bolsas de polietileno debidamente selladas e identificadas (véase marcado). Evitar que queden expuestas al sol durante su transporte, además tener cuidado en el manejo de la bolsa que contiene la muestra para que no sufra ninguna ruptura. El tiempo máximo de transporte de la muestra al laboratorio, no debe exceder de 8 horas.

### **1.3. Preparación de la muestra**

La secuencia del muestreo por parámetro se debe realizar conforme con lo descrito en los puntos correspondiente con el propósito de minimizar sesgos en los resultados.

### **1.4. Recipientes para cada parámetro**

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales en por ciento en peso para huevos de helmintos el contenido de éstos deberá ser menor o igual al 2%.

- 1 Huevos de helmintos, sólidos totales y sólidos volátiles



Los recipientes de polietileno o polipropileno inerte de 500 ml de capacidad, antes de la toma de muestra deben ser enjuagados primero con agua potable a chorro y luego con agua destilada.

Para el caso de huevos de helmintos, se toma el peso en fresco que corresponda a 2 g de sólidos totales. Para el caso de sólidos totales y volátiles se llenan los recipientes hasta un 75% de su capacidad total, se cierran, etiquetan y mantienen en refrigeración, hasta su análisis, excepto para que se mantiene a temperatura ambiente.

## 2 Coliformes fecales y *Salmonella* spp.

Los recipientes de polietileno o polipropileno inerte de 500 mL de capacidad, antes del muestreo deben ser esterilizados preferentemente en autoclave. Posteriormente, se deposita la muestra que corresponda a 4 g de sólidos totales. Etiquetarlos y mantenerlos en refrigeración hasta su análisis.

### 1.4.2 Preservación y almacenamiento de la muestra

La preservación y tiempo máximo para análisis de huevos de helmintos, coliformes fecales y *Salmonella* spp:

PARÁMETROS	PRESERVACIÓN *	TIEMPO MÁXIMO DE ANÁLISIS
Huevos de helmintos	4°C	30 días
Coliformes fecales y <i>Salmonella</i> spp.	4°C	48 horas

\*A partir de su toma y hasta antes de iniciar el análisis, la muestra debe mantenerse en refrigeración.

\*\*Si la muestra es tomada en el laboratorio, debe mantenerse la temperatura constante o ambiente durante el transporte y analizarla inmediatamente.



Figura A1.1 "Tambo" receptor de 20 L



## Anexo 2

### METODOLOGÍAS ANALÍTICAS EMPLEADAS (Humedad, sólidos totales y volátiles, pH, carbono orgánico total)

#### A2.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN SÓLIDOS, NMX-016 (DOF, 1984)

##### 1.-APARATOS Y EQUIPO

- Balanza analítica con sensibilidad de 0.001g
- Espátula para balanza
- Estufa con temperatura 423K (150°C) con sensibilidad 1.5K (1.5°C) capaz de mantener una temperatura constante
- Cajas de aluminio con tapa de 250cm<sup>3</sup>
- Guantes de asbesto
- Desecador con deshidratante
- Equipo usual de laboratorio

##### 2.-PROCEDIMIENTO

2.1 Se coloca la caja abierta y su tapa en la estufa a 120°C durante dos horas, transcurrido ese tiempo, se tapa la caja dentro de la estufa, e inmediatamente se pasa al desecador durante dos horas como mínimo o hasta obtener peso constante.

2.2 Se vierte la muestra sin compactar hasta un 50% del volumen de la caja.

2.3 Se pesa la caja cerrada con la muestra y se introduce destapada a la estufa a 60°C durante 2 horas, se deja enfriar y se pesa nuevamente. Se repite esta operación las veces que sea necesario hasta obtener peso constante (se considera peso constante cuando entre dos pesadas consecutivas la diferencia es menor al 0.01%).

NOTA: Durante este procedimiento debe utilizarse pinzas.

##### 3.-CÁLCULOS

El porcentaje de humedad se calcula con la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que para obtener G y G<sub>1</sub> se debe restar el peso de la caja.

$$H = \frac{G - G_1}{G} \times 100$$

H = Humedad en %

G = Peso de la muestra humedad en g

G<sub>1</sub> = Peso de la muestra seca en g





---

## A2.2 SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES (APHA, AWWA, WPCF, 1992)

- 1.- Se pone una cápsula de porcelana a secar en el horno a peso constante. 2 h a 130°C.
- 2.- Se pone en el desecador y se pesa.
- 3.- Se coloca una muestra de lodo residual de una planta de tratamiento en la cápsula equivalente a un volumen de 100 mL y se pesa.
- 4.- Se seca en el horno la cápsula con la muestra. 12 h a 100°C-110°C.
- 5.- Retirar de la estufa, dejar enfriar en el desecador.
- 6.- Pesar tan pronto como se equilibre con temperatura ambiente.
- 7.- Se mete a la mufla una hora a 500° C.
- 8.- Se pesa tan pronto como se equilibre con la temperatura ambiente utilizando un desecador.

Cálculos:

Para obtener los sólidos totales:

1. Peso de sólidos totales.
  - a. Peso de la cápsula + muestra seca
  - b. Peso de la cápsula

$$\text{PESO DE SÓLIDOS TOTALES} = a - b$$

Para sacar el % de sólidos totales obtenidos:

2. **% DE SÓLIDOS TOTALES =  $\frac{\text{peso de sólidos totales (g)}}{\text{peso de muestra húmeda (g)}} \times 100$**

Para sacar los sólidos volátiles:

3. Peso de sólidos volátiles:
  - a. peso de la cápsula + composta seca
  - b. peso de la cápsula + cenizas

$$\text{PESO DE SÓLIDOS VOLÁTILES} = a - b$$

Para la obtención de % de sólidos volátiles:

4. **% Sólidos Volátiles =  $\frac{\text{peso de sólidos volátiles (g)}}{\text{peso de sólidos totales (g)}} \times 100$**



---

### A2.3 DETERMINACIÓN DEL pH, NMX-25 (DOF, 1984)

#### OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

La presente norma establece el método potenciométrico para la determinación del valor del pH en los residuos sólidos. El cual se basa en la actividad de los iones hidrógeno presentes en una solución acuosa de residuos sólidos al 10%.

#### 1.-APARATOS Y EQUIPO

Balanza analítica con sensibilidad de 0.001 g.

Potenciómetro con compensador de temperatura, electrodo de vidrio y electrodo de referencia.

Agitador magnético con magnetos recubiertos de teflón o agitador mecánico.

Termómetro de vidrio con escala de 263 K a 393 K (-10°C a 120°C).

Equipo usual de laboratorio.

#### 2.-MATERIALES Y REACTIVOS

Solución amortiguadora de pH = 4.0

Solución amortiguadora de pH = 11.0

Solución amortiguadora de pH = 7.0

Agua destilada.

#### 3.-PROCEDIMIENTO

- Calibrar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras de pH=4, pH=7 y pH=11, según sea el tipo de residuo sólido por analizar.
- Pesar 10 g de muestra y transferirlos a un vaso de precipitado de 250 cm<sup>3</sup>
- Añadir 90 cm<sup>3</sup> de agua destilada.
- Mezclar por medio del agitador durante 10 minutos
- Dejar reposar la solución durante 30 minutos.
- Determinar la temperatura de la solución. Sumergir los electrodos en la solución y hacer la medición de pH.
- Sacar los electrodos y lavar con agua destilada.
- Sumergir los electrodos en un vaso de precipitados con agua destilada.

NOTA: Para el manejo y cuidados que se deben tener con el potenciómetro, es necesario seguir las indicaciones y recomendaciones del fabricante.

#### 8.-CÁLCULOS

- El valor del pH de la solución, es la lectura obtenida en la carátula del potenciómetro, cuando los electrodos se sumergen en ella.



#### A2.4. OBTENCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

Para obtener el valor del C se requiere determinar el contenido de cenizas, las muestras se ponen en una mufla a 550°C por 2 h (APHA, AWWA. WPCF, 1992) y, posteriormente, se utiliza la ecuación (Golueke, 1977) ya que es la que se ha estado utilizando en la obtención del COT para "compostas" (Miralles-de-Imperial *et al.*, 2002; Gotass, 1956).

$$\% \text{ COT} = \frac{(100 - \% \text{ Cenizas})}{1.8}$$



## ANEXO 3

### MÉTODOS PARA CUANTIFICACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS Y COLIFORMES FECALES EN LODOS Y BIOSÓLIDOS (DOF, 2002)

#### A3.1 MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS EN LODOS Y BIOSÓLIDOS

##### 1. Principio

La prueba se basa en el siguiente principio:

Por medio de lavados continuos, combinados con diversas etapas de filtración y flotación se logra la separación de los huevos de helmintos del resto de las partículas de mayor y menor tamaño, así como su concentración.

##### 2. Muestreo, preparación y acondicionamiento de la muestra

Preparar recipientes de plástico inerte de 500 mL de boca ancha y de cierre hermético, previamente desinfectados con cloro comercial, lavados con agua potable a chorro y enjuagados con agua destilada.

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso para, posteriormente, tomar en los recipientes el peso en fresco (X) que corresponda a 2 g de ST, para todo tipo de lodos.

Mantener la muestra a una temperatura de 4°C ± 2°C hasta su llegada al laboratorio.

A partir de su toma y hasta antes de ser procesada, la muestra debe estar en refrigeración hasta su análisis.

##### 3. Cálculos

1 La fórmula para calcular g es:

$$g = \frac{r \text{ (rpm)}}{k}$$

donde:



g = fuerza relativa de centrifugación

k = constante cuyo valor es 89, 456

r = radio de la centrifuga en cm

rpm = revoluciones por minuto

2 Para el cálculo del por ciento de sólidos totales (ST), se utiliza el % de humedad como sigue:

$$\% \text{ de sólidos totales} = 100\% - \% \text{ de humedad} \quad (2)$$

#### 4. Expresión de resultados

% de sólidos totales = 100% -% de humedad

1 Expresar los resultados en número de huevos/2 g de sólidos totales (volumen de muestra analizada).

$$H/2g \text{ ST} \quad (3)$$

donde:

H = número de huevos leídos en la muestra

gST = gramos de sólidos totales de la muestra analizados

#### 5. Preparación de soluciones

Los siguientes puntos describen la secuencia del método de prueba, el cual debe realizarse conforme a lo descrito, con el fin de minimizar sesgos en los datos obtenidos.

Solución ácido alcohol, homogeneizar 650 mL de ácido sulfúrico 0.1 N con 350 mL de alcohol etílico. Almacenar la solución en un recipiente hermético.

Solución de formalina al 0.5%, añadir 5 mL de formaldehído al 37% y aforar a 1 000 mL con agua destilada. Homogeneizar y almacenar en recipiente hermético.

Solución patrón de aceto-acético, agregar 15 g de acetato de sodio trihidratado, 3.6 mL de ácido acético y aforar a 1 000 mL de agua destilada. Homogeneizar y almacenar en frasco hermético durante 2 a 3 meses.

Solución de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ) con gravedad específica de 1.3. Disolver 800 g de sulfato de zinc heptahidratado ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) en 1 000 mL de agua destilada, mezclar en la parrilla magnética hasta homogeneizar totalmente. Medir la densidad con el densímetro y, según sea el caso, ajustar la densidad a 1.3 agregando sulfato de zinc o agua destilada, según se requiera. Almacenar en recipiente hermético y verificar densidad cada mes.

Tween 80 al 0.1%, añadir 1 mL del reactivo en 999 mL de agua destilada y homogeneizar en parrilla de agitación hasta su completa disolución. Almacenar en recipiente hermético durante 2 a 3 meses.



## 6. Manejo de residuos

Todos los residuos de la muestra analizada serán esterilizados en autoclave antes de su desecho.

Aquel material que sea reutilizado, pero que no pueda ser esterilizado en autoclave deberá ser colocado en hipoclorito de sodio (10%), durante un día, antes de ser lavado.

## 7. Determinación de viabilidad y lectura al microscopio

**a)** Si no es necesario determinar la viabilidad, proceder a la cuantificación, en caso contrario, incubar el tubo con la muestra durante 4 semanas a  $26^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  agregando una solución de ácido sulfúrico 0.1N. Dejar la tapa del tubo floja para que entre aire y, por lo menos una vez por semana, verificar que el nivel del líquido no disminuya. Si es necesario, agregar agua destilada. En caso de que la muestra presente la formación de hongos durante el proceso de incubación, se recomienda reemplazar el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por formalina al 1.5%.

**b)** Una vez transcurrido el tiempo de incubación, homogeneizar la pastilla y proceder a la cuantificación de los huevos. Para la lectura verter el sedimento final en una celda de Sedgwich Rafter o Disco Doncaster. En caso necesario, y para evitar la sobreposición de estructuras y del detritus no eliminado, distribuir en alícuotas y homogeneizar con agua destilada. Sólo aquellos huevos donde se observe la larva se consideran viables.

**c)** Como paso opcional, y antes de realizar la lectura al microscopio, añadir hipoclorito de sodio (10%) en igual volumen al sedimento final y dejar reposar durante 10 minutos. Aforar con agua destilada.

**d)** Centrifugar a 660 g durante 5 minutos y decantar hasta dejar 5 mL del sobrenadante.

**e)** Realizar un segundo enjuague con agua destilada y centrifugar bajo las mismas condiciones. Lo anterior permite una mayor claridad en el contenido interno de los huevos (especialmente de *Ascaris* y *Trichuris*), una mejor diferenciación y, en consecuencia, un conteo más rápido.

**f)** Aspirar sobrenadante hasta 5 mL del volumen final.



## 8. Procedimiento (DOF, 2002)

### Diagrama de flujo para Huevos de Helmintos NOM-004, (DOF, 2002)





## **A3.2.-MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN LODOS Y BIOSÓLIDOS**

### **1. Principios del método**

Este método de análisis se basa en que:

**1.1** Las bacterias presentes en una muestra pueden ser separadas por agitación, dando por resultado una suspensión de células bacterianas, uniformemente distribuidas.

**1.2** A través de diluciones sucesivas de la muestra se obtienen inóculos de, al menos, una célula para obtener crecimiento en el medio de cultivo (tubos positivos), y otros que al sembrarse dan resultado en por lo menos, un tubo de la serie.

**1.3** La combinación de resultados positivos y negativos permite realizar una estimación de la densidad bacteriana por medio de cálculos de probabilidad.

**1.4** La técnica seleccionada permite el estudio de un volumen de muestra suficiente para obtener resultados significativos, considerando la alta turbidez que la muestra pudiera presentar a causa de la gran cantidad de material acumulado. En caso de aplicar técnicas como filtro de membrana se correría el riesgo de un cálculo de coliformes fecales inferior al real.

### **2. Muestreo, preparación y acondicionamiento de la muestra**

El muestreo constituye una parte integral y fundamental de cualquier programa de evaluación de calidad de lodo.

**2.1** La muestra deberá ser tomada en frascos de 500 mL de capacidad, de boca ancha y previamente esterilizados.

**2.2** Las muestras deben ser colocadas en hieleras con bolsas refrigerantes o hielo inmediatamente después de su toma.

**2.3** Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo.

**2.4** A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso y posteriormente se obtendrá el peso en fresco que corresponda a 4 g de ST.

**2.5** A partir de su toma y hasta antes de ser procesada, la muestra debe estar en refrigeración y no transcurrir más de 48 horas.

### **3. Reactivos y materiales**

#### **3.1. Reactivos**

**3.1.1** Alcohol etílico.

**3.1.2** Caldo lauril-triptosa con púrpura de bromocresol (C.L.T.).

**3.1.3** Caldo lactosado con púrpura de bromocresol (C.L.).

**3.1.4** Medio *Escherichia coli* (EC).

**3.1.5** Monofosfato de potasio

**3.1.6** Cloruro de magnesio.

**3.1.7** Hidróxido de sodio.

**3.1.8** Agua destilada.

#### **3.2 Materiales**

**3.2.1** Asa de inoculación.

**3.2.2** Barras magnéticas.

**3.2.3** Bulbo de goma.

**3.2.4** Espátula.





**3.2.5** Frascos de 500 mL de capacidad con tapa de cierre hermético, boca ancha y con capacidad de esterilización en autoclave.

**3.2.6** Gradillas y canastillas de acero inoxidable.

**3.2.7** Guantes de látex.

**3.2.8** Mechero de Bunsen, lámpara de alcohol o similar.

**3.2.9** Pipetas graduadas de vidrio de 1.5 y 10 mL.

**3.2.10** Portapipeteros de acero inoxidable.

**3.2.11** Tapabocas.

**3.2.12** Tapones de acero inoxidable para tubos de ensayo (18 mm x 180 mm, 16 mm x 150 mm o de 12 mm x 120 mm).

**3.2.13** Tubos de Durham (7 mm x 4.5 mm o de 5 mm x 4 mm).

**3.2.14** Tubos de ensayo (18 mm x 180 mm, 16 mm x 150 mm o 12 mm x 120 mm).

**3.2.15** Tubos de rosca (13 mm x 100 mm).

#### **4. Aparatos e instrumentos**

**4.1** Autoclave a una presión de 1.05 kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 121°C.

**4.2** Balanza analítica con intervalo de medición de 0.0001 a 10.00 g.

**4.3** Balanza granataria con intervalo de medición de 0.1 a 100 g.

**4.5** Estufa de esterilización con capacidad para medir temperatura de 170°C ± 10°C.

**4.6** Incubadora con capacidad para operar a una temperatura de 37°C ± 0,2°C.

**4.7** Parrilla con agitación y calentamiento.

#### **5. Procedimiento**

Los puntos siguientes describen la secuencia del método de prueba, el cual debe realizarse conforme a lo descrito, con el fin de minimizar sesgos en los datos obtenidos.

**5.1** Preparación de medios de cultivo y soluciones

**5.2** Calibración de aparatos

Todos los equipos utilizados deben ser calibrados o ajustados de acuerdo a las especificaciones del fabricante o bien contra equipos certificados.

**5.3** Seguridad

Durante el procesado de la muestra se debe utilizar guantes de látex y cubrebocas, para evitar cualquier riesgo de infección.

Se debe lavar y desinfectar el área de trabajo, así como el material utilizado por el analista, antes y después del ensayo.

**5.4** Manejo de residuos

Todos los residuos de la muestra analizada y sobrantes serán esterilizados en autoclave antes de su desecho.

**5.5** Preparación de la muestra

**a)** Suspender X g de materia fresca que correspondan a 4 g de sólidos totales en 36 mL de agua de dilución y así obtener una dilución de 10<sup>-1</sup>.

**b)** Mezclar durante 2 o 3 minutos, con ayuda de una parrilla de agitación, a velocidad baja (800 rpm), hasta la completa disolución.

**5.6** Preparación de diluciones



Por el origen de las muestras se requieren inóculos menores a 1 mL, utilizando diluciones seriadas de submúltiplos de 10.

**a)** Se preparan diluciones decimales seriadas a partir del homogeneizado resultante ( $10^{-1}$ ) lo antes posible, reduciendo al mínimo la sedimentación. Transferir 1 mL en 9 mL de agua de dilución ( $10^{-2}$ ) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.

**b)** Cada dilución debe ser homogeneizada perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba abajo o con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables.

**c)** Se debe utilizar una pipeta estéril diferente, para cada una de las diluciones decimales subsecuentes. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir, a la muestra, más de la tercera parte de la pipeta.

**d)** Si una muestra o un lote de muestras va a ser analizado por primera vez, utilizar al menos cuatro series de tres (o cinco) tubos cada una, posteriormente tres series de tres tubos serán suficientes.

## 5.7 Determinación de coliformes fecales

### 5.7.1 Prueba directa (medio A-1)

La prueba directa del medio líquido A-1 es un método de un solo paso que no requiere confirmación. Sin embargo, su uso representa un mayor costo ya que este medio no se encuentra en forma deshidratada, siendo necesario prepararlo a partir de sus ingredientes básicos.

**a)** Adicionar por triplicado 1 mL de cada una de las diluciones preparadas en tubos conteniendo líquido A-1 correctamente etiquetados. Incubar durante 3 horas a  $35 \pm 0.5^\circ \text{C}$ .

**b)** Una vez transcurrido el tiempo los tubos se transfieren a un baño de agua a una temperatura de  $44.5 \pm 0.2^\circ \text{C}$  y se incuban durante otras  $21 \pm 2$  horas.

**c)** La presencia de gas en cualquier cultivo en medio A-1 a las 24 horas o menos de incubación es una reacción positiva que indica la existencia de coliformes de origen fecal.

### 5.7.2 Prueba indirecta

#### 5.7.2.1 Prueba presuntiva (caldo lauril-triptosa o caldo lactosado)

**a)** Transferir 1 ml de las diluciones seleccionadas a cada una de las series de tubos correspondientes conteniendo el caldo lauril o caldo lactosado e incubar a  $35 \pm 0.5^\circ \text{C}$ .

**b)** Examinar cada tubo a las  $24 \pm 2$  horas. La acidificación, con o sin producción de gas (cambio de coloración de púrpura a amarillo), a partir de la fermentación de la lactosa en el medio de cultivo, indica una prueba presuntiva positiva de la presencia de bacterias del grupo coliformes. En caso contrario reincubar durante otras 24 horas más.

**c)** La acidificación del medio, con o sin formación de gas dentro de las  $48 \pm 3$  horas, constituye una prueba presuntiva positiva. Cuando no existe acidificación del medio, constituye una prueba.

#### 5.7.2.2 Prueba confirmativa flama del (medio EC)

**a)** Los tubos positivos de la prueba presuntiva se resiembran por triple asada (esterilizada al mechero y enfriada) en tubos de fermentación presuntiva negativa que contengan caldo EC e incubados a  $44.5 \pm 0.2^\circ \text{C}$  en baño de agua.

**b)** Examinar cada tubo a las  $24 \pm 2$  horas.

**c)** El resultado será positivo cuando haya producción de gas a partir de la fermentación de la lactosa contenida en el medio EC. Los tubos sin formación de gas se desechan.



## 6. Cálculos

**6.1.** El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio EC o en A-1. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en la tabla, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

$$\text{NMP} = (\text{NMP de tablas}) \times (10 / \text{mayor volumen inoculado}) \quad (1)$$

Por ejemplo: en medio EC se obtuvo el código 3/3 para la serie de la dilución 0.01; 2/3 para la serie de la dilución 0.001 y 1/3 para la serie de la dilución 0.0001.

**6.2** El código es de 3, 2, 1; el índice de coliformes en tabla es de 150, por lo que el resultado es:

$$\text{NMP/g ST} = (150) \times (10/0.01) = 150\ 000 \quad (2)$$

$$\text{NMP/g ST} = 1.5 \times 10^5 \text{ coliformes fecales} \quad (3)$$

**6.3** Cuando se inoculan más de tres volúmenes decimales, para la composición del código se utilizan los resultados positivos correspondientes a tres series consecutivas inoculadas.

**6.4** En ocasiones algunos de los posibles resultados de tubos múltiples son omitidos de las tablas del NMP. Así los códigos como 0-0-3, 0-0-4 y 0-0-5 junto con muchos otros, no están incluidos. Ello se debe a que la probabilidad de su ocurrencia es muy baja. Si en un laboratorio dichos resultados improbables aparecen con una frecuencia mayor de 1%, es posible que se deban a procedimientos equivocados en el mismo, por lo que deben ser revisados. Cuando el código del NMP no aparezca en tablas, se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{NMP} = (\text{Número de tubos positivos} \times 100) / \sqrt{[(\text{mL muestra tubos neg.}) \times (\text{mL muestra total})]} \quad (4)$$

La frecuencia de obtención de resultados que no se encuentren en las tablas debe ser baja (< 1%), de otra forma se tendrá que revisar y confirmar el procedimiento de la prueba.

## 7. Expresión de resultados

**7.1.** La densidad de los coliformes fecales se expresa como NMP de coliformes por g de materia seca o ST, el cual se obtiene a partir de tablas ya establecidas, las cuales incluyen los límites de confianza al 95% para cada una de las combinaciones de tres (o cinco) series de tubos positivos posibles. Para su utilización se proporcionan códigos formados por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas.

### 7.2. Interferencias

La posible presencia de otras bacterias que producen ácido a partir de lactosa, lo que se elimina en la prueba confirmativa a la temperatura de 44.5°C.

Es importante que los tubos de Durham colocados en los tubos de fermentación, una vez preparados y esterilizados, no presenten aire en su interior. En caso contrario se pueden obtener resultados positivos falsos.

## 8. Informe de prueba

El informe de prueba incluye especificar los siguientes puntos:

- a) Todos los datos necesarios para la identificación completa de la muestra;
- b) Los resultados, expresados de acuerdo con lo establecido en el inciso 8, y
- c) Cualquier suceso particular observado durante el curso del análisis, así como cualquier operación no especificada en el método, o considerada opcional, que pueda haber influido en los resultados.

## ANEXO 4

### MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO DE LOS SISTEMAS PROTOTIPO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL Y VERTICAL (Tomado de la tesis de Rodríguez y Varela, 2003)

#### A4.1 Zona Cultural de la Ciudad Universitaria

Parte de las actividades estuvieron enfocadas en la estabilización y optimización del HAFVD ubicado en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria. Dadas las condiciones en que se encontraba el sistema, se inició con un mantenimiento general (limpieza de sedimentador, poda de hidrofitas, ajustar el flujo automático así como la revisión bibliográfica, sobre esta ecotecnología.

##### A4.1.1 Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo vertical descendente, (HAFVD)

El humedal tiene un área de  $15\text{m}^2$  conformados por 2.5m de ancho y 6m de largo, con una profundidad de 1.3m, a partir del lecho, obteniendo con esto un volumen total de  $19.5\text{m}^3$ . El medio de soporte está conformado de escoria volcánica dividido en 5 capas de diferente tamaño (Durán-de-Bazúa y col., 1998). La porosidad global del soporte es de 0.48. En la Figura A4.1 se pueden apreciar las diferentes capas del sustrato con sus diferentes tamaños de partícula.

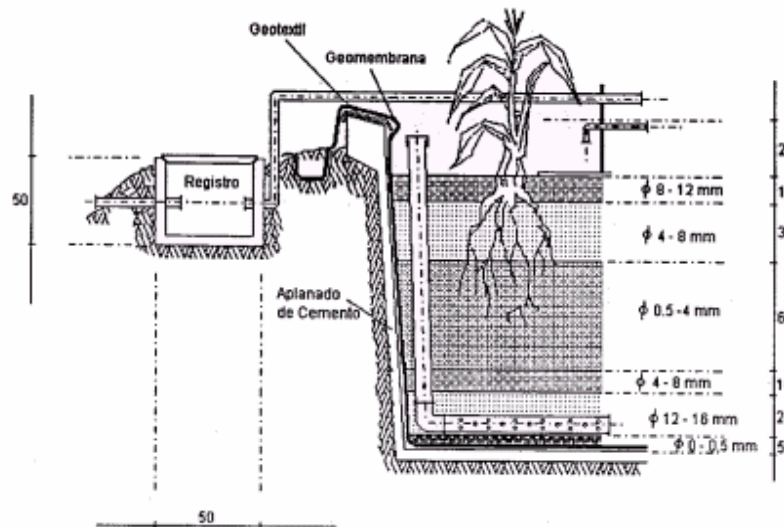


Figura A4.1 Detalles de los perfiles en el HAFVD (Rodríguez y Varela, 2003)

El sistema cuenta con un recubrimiento de polipropileno (PPE), el cual fue colocado sobre las paredes y fondo de cemento del reactor (humedal). Este recubrimiento, conocido como geomembrana sirve de protección impermeable para, por un lado, evitar las infiltraciones al



subsuelo que contaminen los mantos acuíferos en caso de agrietamientos en las paredes y fondo provocados por asentamientos o movimientos telúricos) y, por otro lado, proteger esas paredes y fondo de bacterias que degradan el concreto, evitando que el agua residual pase al subsuelo. En las Figuras A4.2 y A4.3 se pueden apreciar las paredes de cemento y la geomembrana cubriendo estas paredes.



Figura A4.2 Paredes de concreto del HAFVD



Figura A4.3 Paredes cubiertas con la geomembrana

En las Figuras A4.4 y A4.5 se observan el tanque sedimentador (fosa séptica) y el tanque homogeneizador. En la Figura A4.6 se muestra la electro-bomba.



Figura A4.4 Sedimentador primario del HAFVD (fosa séptica)



Figura A4.5 Tanque homogeneizador o segundo sedimentador del HAFVD

Una de las características principales de HAFVD es la forma de alimentación, la cual se realiza irrigando el agua residual sobre toda la superficie del lecho, de la manera más homogénea posible. Para ello se tratan de evitar flujos preferenciales y de dar una forma de película o capa fina al flujo de entrada. El agua residual pasa a través del humedal escurriéndose en forma vertical por la zona de la rizósfera y espacios huecos, en donde se realiza el contacto de los contaminantes disueltos



en el agua con los microorganismos y el oxígeno acumulado en los espacios huecos, además del proporcionado por la actividad fotosintética de las plantas.

Este escurrimiento se lleva a cabo, en el sistema en estudio, a lo largo de un metro, para llegar a la zona húmeda que consta de 30 centímetros de profundidad, en donde por gravedad va a ir desplazando al agua que se encuentra al fondo del humedal. En la Figura A4.6 se puede apreciar esquemáticamente como está construido el HAFVD.

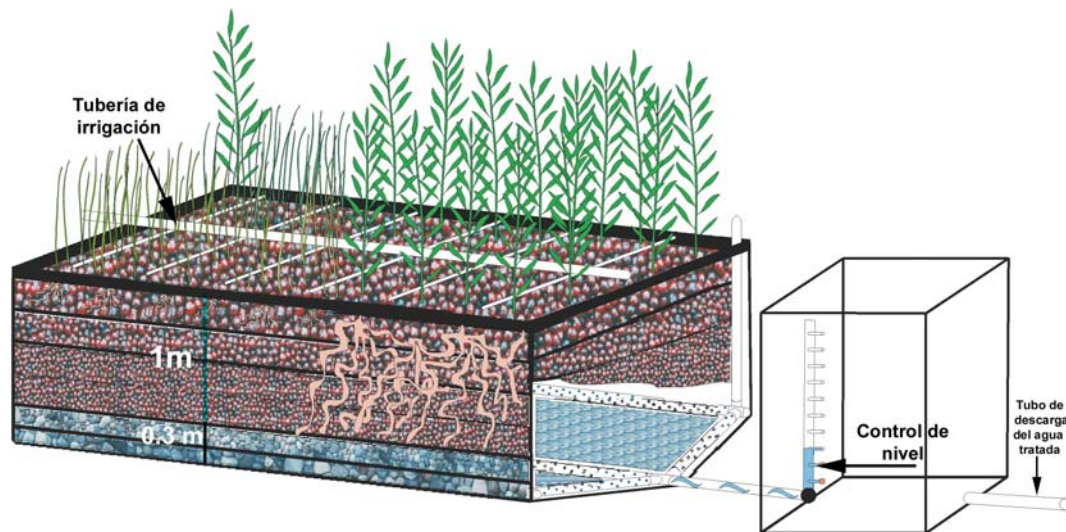


Figura A4.6 Esquemática de la salida del HAFVD  
(Rodríguez y Varela, 2003)

Se tuvieron algunos problemas durante este semestre con el mantenimiento y la operación de este sistema por lo que se hizo uso de las técnicas de solución que proponen Rodríguez y Varela, 2003, la cual se muestra en la Tabla A4-1.





Tabla A4-1 Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFVD

<b>Situación observada</b>	<b>Problema real</b>	<b>Acción correctiva</b>	<b>Resultado</b>	<b>Sugerencias</b>
El nivel de agua dentro del humedal rebasa el nivel del lecho ocasionando una inundación	El humedal está trabajando en condiciones que no son adecuadas para este sistema en específico	Bajar la manguera de descarga en la cisterna hasta llegar a una altura adecuada	Las plantas empiezan a reverdecer y el sistema empieza a trabajar adecuadamente	Verificar el nivel de inundación dentro del humedal continuamente
Se observa que los sedimentadores están sobresaturados de material sobrenadante	Ambos sedimentadores no han tenido mantenimiento en un largo tiempo	Se solicita apoyo para el desazolve de ambos sedimentadores a las autoridades de la UNAM	Se reduce la carga en DQO en las muestras de entrada al humedal	Se recomienda realizar un desazolve regularmente cada seis meses
Las plantas tienen color amarillento y algunas están secándose	El clima es muy seco durante la etapa de invierno y algunas partes de la tubería de irrigación está tapada con lodos	Elevar el nivel de inundación del humedal y limpiar la tubería	Las plantas recuperan su color verde y siguen creciendo además de empezar a reproducirse	Se recomienda revisar la tubería de irrigación continuamente (una vez por semana)
El porcentaje de DQO aumenta y el sedimentador secundario se satura de lodos y materia sobrenadante	Una de las tuberías pasa directamente al sedimentador lo que ocasiona un incremento de lodos	Realizar una adaptación a esta tubería para evitar la entrada de aguas sin un tratamiento previo	Disminución de la carga orgánica y obtención de un tiempo más largo para realizar los desazolves	Debido a que hay dos edificios los cuales generan aguas residuales se recomienda hacer un sedimentador más grande
Mala distribución en el flujo de alimentación al humedal	La tubería de irrigación está obstruida o se desmontó alguna parte	Limpiar y ensamblar bien la tubería de irrigación	Mejor distribución del flujo a la entrada e incremento en la depuración	Revisar la tubería de irrigación cada 15 días



## A4.2. Vivero Forestal de Coyoacán

### A4.2.1 Condiciones de operación para el humedal artificial de flujo horizontal, HAFH

Las actividades durante el periodo experimental estuvieron encaminadas a la ejecución de la puesta en operación y seguimiento del humedal artificial para tratamiento de agua residual a escala prototipo ubicada en las instalaciones de los "Viveros" de Coyoacán. El sistema tiene las siguientes dimensiones: largo 15 metros, ancho 5 metros y profundidad 0.7 metros. El lecho o medio de soporte está conformado por escoria volcánica, distribuida uniformemente con un diámetro de partícula de 12.7mm. El lecho está dentro de una cuenca o alberca recubierta por muros de concreto, los cuales están cubiertos con una geomembrana. La porosidad promedio del medio de soporte o lecho es del 48%. Las plantas predominantes en el humedal artificial de flujo horizontal son los carrizos (*Phragmites australis*) aunque también se encuentran algunos papiros.

Las condiciones de operación se muestran en la Tabla A4-2.

Tabla A4.2 Condiciones de operación del HAFH

Posición de apertura en la válvula de alimentación	Flujo alimentado hacia el humedal, m <sup>3</sup> /día	Tiempo de residencia hidráulico, días
½	10.52	2.74
¼	5.37	5.30

El agua residual alimentada al sistema es tomada del efluente del río Magdalena, el cual al recibir aportaciones de las comunidades aledañas a su cauce y ser entubado y usado como colector de aguas residuales de toda clase, se le considera del tipo mixto.

Es succionada mediante una bomba sumergible marca BARNES, que descarga el agua residual en un sedimentador primario (fosa séptica), con una capacidad nominal de 1846 litros. El tiempo de residencia hidráulico del agua residual en el sedimentador fue de 30 min (½ hora). Mediante una válvula de globo se controla el flujo de alimentación hacia el biorreactor (el tiempo de residencia hidráulica en el sedimentador varía dependiendo de la posición de apertura de la válvula de alimentación al humedal).

El influente es alimentado en forma continua por uno de los extremos del biorreactor, donde comienza la pendiente del mismo. El sistema de alimentación es un tubo horizontal perforado, que está montado de manera tal que facilite la infiltración por gravedad al lecho del humedal. La





distribución del agua residual dentro del biorreactor se efectúa en forma horizontal, hasta el nivel de inundación de 50 a 55 centímetros. De esta forma se busca eliminar caminos preferenciales que reduzcan el área real de transferencia de masa y, por ende, la transformación de los contaminantes orgánicos en materiales inorgánicos como el CO<sub>2</sub>, agua, nitratos y sulfatos.

El agua tratada se recibe en una cisterna elaborada para tal efecto. Las dimensiones de la cisterna son las siguientes: 1 metro de largo, 0.91 metros de ancho y 2 metros de profundidad. La altura máxima de descarga de la cisterna es de 0.55 metros.

Dispone de un sistema de descarga, compuesto por un flotador interruptor horizontal marca SUMPTROL y de una motobomba eléctrica de 0.5 HP de potencia marca SIEMENS. (Figura A4.7) La descarga del agua residual se efectúa hacia los canales de distribución del Vivero Forestal de Coyoacán para el riego de especies arbóreas.



Figura A4.7 Vista desde arriba de la cisterna de salida del humedal de Viveros de Coyoacán

En la Figura A4.8 muestra una vista lateral de la obra civil para el humedal artificial de flujo horizontal. En dicha figura se observa con detalle la distribución del material de empaque, así como algunas características de la tubería de PVC usada en la construcción.

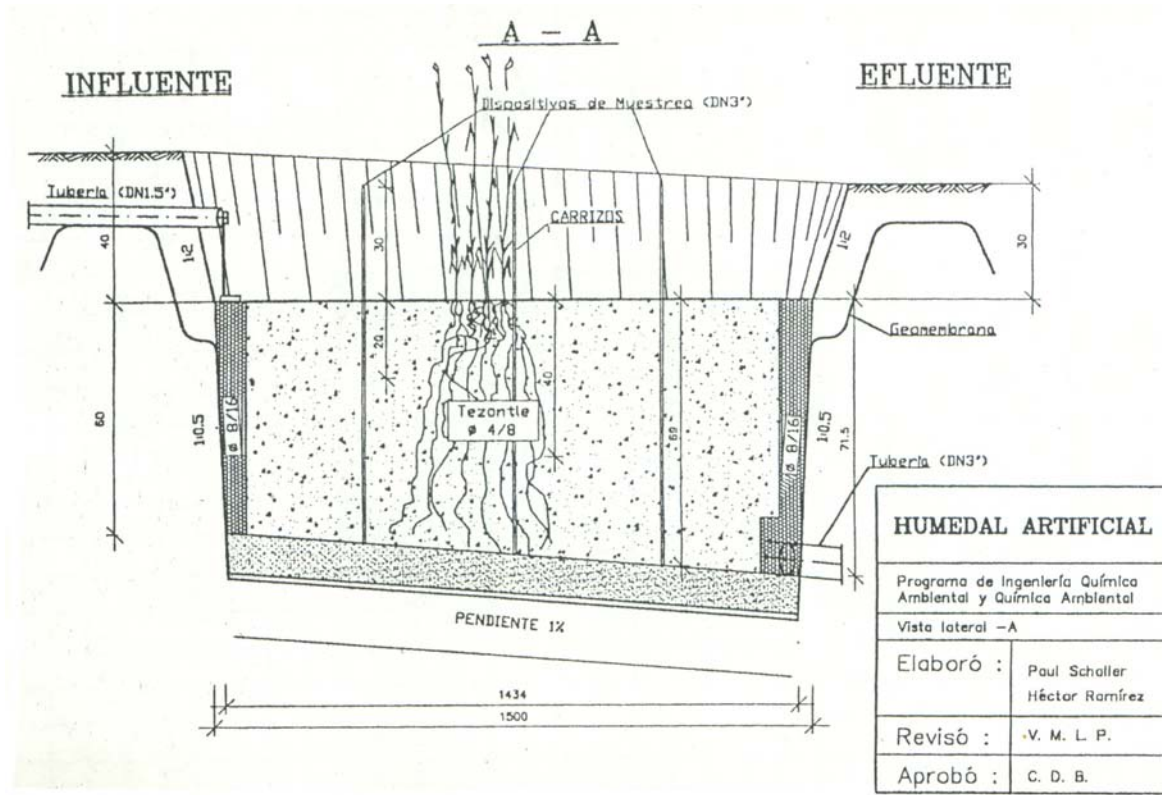


Figura A4.8 Detalle lateral de la obra civil para el humedal artificial de flujo horizontal (Ramírez-Carrillo, 1998)

Se realizó una poda parcial de las plantas, como lo muestra la Figura A4.9, seguida de una purga de lodos del sedimentador y la extracción de lodos para conformar la "composta" de lodos primarios e hidrofitas (Figura A4.10), así como la colocación de una bomba nueva dentro de la cisterna ya que la bomba anterior se descomposó.



Figura A4.9 Vista general de la poda parcial en el humedal



Figura A4.10 Labores de purga de lodos en el sedimentador y su extracción para experimentación



Al igual que en el humedal de flujo vertical descendente que se encuentra en Zona Cultural se tuvieron algunos problemas de mantenimiento y operación y se hizo referencia a las soluciones propuestas por Rodríguez y Varela, 2003 (Tabla A4.7).

Tabla A4.7 Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFH

<b>Situación observada</b>	<b>Problema real</b>	<b>Acción correctiva</b>	<b>Resultado</b>	<b>Sugerencias</b>
El gasto de entrada al humedal disminuye paulatinamente hasta suspenderse	Obstrucción de la malla de retención dentro del sedimentador, debido a que está ubicada en la zona de acumulación de sólidos	Desmontar la malla y operar sin ella	El gasto de entrada se normaliza	En un equipo de sedimentación, debe colocarse una malla de retención por arriba del nivel de acumulación de los sólidos sedimentables
El contenido de sólidos sedimentables en el influente del humedal aumenta	La toma del tubo de succión se encuentra a la altura de la zona de acumulación de sólidos en el sedimentador	Cambiar la dirección del tubo, hacia la región intermedia del tanque sedimentador, libre de sólidos sedimentados o sobrenadantes	El contenido de sólidos en el influente del humedal disminuye hasta cantidades aceptables	El tubo de descarga del sedimentador primario debe ubicarse en una zona libre de acumulación de sólidos
La acumulación de sólidos sedimentables dentro del sedimentador primario ha sido mayor al valor de diseño	El río arrastra gran cantidad de sólidos en suspensión	Se retiran los sólidos en el sedimentador primario con ayuda de una moto-bomba solicitada a la encargada del Vivero	El sedimentador puede retener una cantidad importante de sólidos, según el objetivo de diseño	Verificar continuamente el estado de los equipos de retención de sólidos, así como la cantidad de sólidos sedimentables en sus efluentes
Las plantas tienen color amarillento	Las plantas son muy jóvenes y sus raíces no alcanzan el nivel de agua El clima es muy seco durante la etapa de invierno (en la Cd. de México)	Elevar el nivel de inundación del humedal	Las plantas han superado la etapa de adaptación y siguen creciendo	Se recomienda iniciar la siembra de plantas durante la estación húmeda del año o justamente en la primavera antes de que se inicien las lluvias



## ANEXO 5

### DATOS EXPERIMENTALES

- **% DE REDUCCIÓN DE PESO Y DE VOLUMEN DE LA MASA BIODEGRADADA EN REACTORES CILÍNDRICOS DE 28 cm DE DIÁMETRO Y 30 cm DE ALTURA COLOCADOS EN UN CUARTO DE TEMPERATURA CONTROLADA (3.0 m x 2.5 m x 2.5 m)**

REACTOR	PESO TOTAL INICIAL(kg)	PESO TOTAL FINAL(kg)	% REDUCCIÓN DE PESO	ALTURA INICIAL (cm)	ALTURA FINAL (cm)	VOLUMEN INICIAL* (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN FINAL(m <sup>3</sup> )	% REDUCCIÓN DE VOLUMEN
<b>ZC 1</b>	4.5	2.96	<b>34.13</b>	30	5	0.0191	0.0032	<b>83.33</b>
<b>ZC 2</b>	4.5	3.08	<b>31.64</b>	30	6	0.0191	0.0038	<b>80.00</b>
<b>ZC 3</b>	6	3.42	<b>42.95</b>	30	6	0.0191	0.0038	<b>80.00</b>
<b>ZC 4</b>	6	4.29	<b>28.45</b>	30	6.5	0.0191	0.0041	<b>78.33</b>
<b>VV 1</b>	4.5	2.94	<b>34.64</b>	30	8	0.0191	0.0051	<b>73.33</b>
<b>VV 2</b>	4.5	2.27	<b>49.67</b>	30	7	0.0191	0.0045	<b>76.67</b>
<b>VV 3</b>	6	3.83	<b>36.13</b>	30	10	0.0191	0.0064	<b>66.67</b>
<b>VV 4</b>	6	3.64	<b>39.30</b>	30	9	0.0191	0.0057	<b>70.00</b>

\*Volumen inicial: Área de la base x altura útil =  $[\pi (0.1425 \text{ m})^2] 0.30 \text{ m} = 0.0191 \text{ m}^3$



**MEDICIÓN DE TEMPERATURAS, °C**

CONCEPTO	DÍAS																
	5	6	8	9	12	13	14*	16	19	20	21*	22	23	26	27	29	33
<b>CUARTO CALIENTE</b>	22.5	22	22	23	22	22	21	23	24	23	23	23	23.5	23	23	23.5	23
<b>ZC1</b>	30	29	29	27	25	24	27	28	25	24	26	26	24	24.5	24.5	24.5	24
<b>ZC2</b>	30	30	28	28	25	24	26	27	26	24	26	25	25	24.5	25	25	24
<b>ZC3</b>	30	30	28	27	27	25	27	27	25	24	26	26	25	25	25	25.5	25
<b>ZC4</b>	29	29	28	26	27	24	27	28	25	24	25	25	25	25	25	25	25
<b>VV1</b>	30	31	30.5	29	27	25	28	27	26	23	25.5	25	24	25	25	25	24
<b>VV2</b>	30	31	30	28	27	25	27	29	26	24	25	25	24.5	25	25	25.5	25
<b>VV3</b>	31	31	30	28	27	25	27.5	29	27	24	26	26	25	26	26	26	25
<b>VV4</b>	29	29	30	27	25	25	27	27	26.5	24	26	26	26	26	26	26	25

\* Se cubrieron los reactores. Continuación de la tabla:

CONCEPTO	34	36	37	40	41	43	44	47	48	50	51	68	81	85**	88	90
<b>CUARTO CALIENTE</b>	23	23	30	30	28	27.5	28	26	26	28	26	27	26	28	27	26
<b>ZC1</b>	24	24	27	27	27	29	30	28	28	28	28	27	27	25	23	26
<b>ZC2</b>	24	25	27	28	28	31	31	29	29	28	29	28	27	25	23	26
<b>ZC3</b>	25	25	28	28	28	30	30.5	28	28	28	28	27	27	25	23	27
<b>ZC4</b>	25	25	28	28	28.5	31	31.5	29	29	28	28.5	28	27	25	23	27
<b>VV1</b>	24	24.5	28	30	28	30	31	29	29	29	29	28	27	25	24	27
<b>VV2</b>	24.5	25	28	28	27	30	31	29	29	29	29	28	27.5	24	24	27
<b>VV3</b>	25	25	28	28	28	30.5	30	28	28	28	27	28	28	24	24	27
<b>VV4</b>	25	25	28	28	29	31	30	28	28	28	27	28	27	25	24	27



• **% DE HUMEDAD**

SEMANA	REACTOR	% DE HUMEDAD				% HUMEDAD
		*PESO CÁPSULA (g)	*PESO MUESTRA HÚMEDA + CÁPSULA (g)	PESO MUESTRA (g)	*PESO ESTUFA (PESO SECO + CÁPSULA) 110°C	
0	ZC LODOS 1	96.94	179.70	82.76	97.64	<b>99.12 %</b>
	ZC LODOS 2	95.57	157.81	62.24	96.14	
	VV LODOS 1	104.22	151.06	46.84	114.51	<b>78.16 %</b>
	VV LODOS 2	67.47	112.25	44.79	77.19	
1	ZC1	3.54	14.24	10.70	5.39	<b>82.77 %</b>
	ZC 2*	3.54	12.31	8.77	5.23	<b>80.68 %</b>
	ZC 3	3.50	13.84	10.33	5.16	<b>83.95 %</b>
	ZC 4**	3.52	14.25	10.73	5.67	<b>80.03 %</b>
	VV 1	3.53	13.61	10.07	5.76	<b>77.88 %</b>
	VV 2*	3.53	11.37	7.84	5.19	<b>78.88 %</b>
	VV 3	3.52	23.33	19.82	7.96	<b>77.59 %</b>
	VV 4**	3.52	25.04	21.51	8.55	<b>76.65 %</b>
2	ZC1	3.54	12.52	8.98	4.96	<b>84.19 %</b>
	ZC 2*	3.55	14.18	10.62	5.03	<b>86.13 %</b>
	ZC 3	3.50	13.67	10.16	5.72	<b>78.19 %</b>
	ZC 4**	3.52	11.51	7.98	4.67	<b>85.62 %</b>
	VV 1	3.53	10.60	7.07	4.96	<b>79.84 %</b>
	VV 2*	3.53	10.66	7.13	4.84	<b>81.60 %</b>
	VV 3	3.52	13.81	10.29	6.12	<b>74.74 %</b>
	VV 4**	3.52	11.40	7.88	5.31	<b>77.31 %</b>
3	ZC1	3.54	22.99	19.45	6.03	<b>87.22 %</b>
	ZC 2*	3.54	23.92	20.38	6.84	<b>83.79 %</b>
	ZC 3	3.50	26.56	23.06	7.54	<b>82.48 %</b>
	ZC 4**	3.52	20.56	17.04	6.18	<b>84.42 %</b>
	VV 1	3.53	22.75	19.22	7.25	<b>80.65 %</b>
	VV 2*	3.53	24.69	21.16	7.65	<b>80.52 %</b>
	VV 3	3.52	34.47	30.96	11.69	<b>73.60 %</b>
	VV 4**	3.52	40.19	36.66	12.20	<b>76.34 %</b>
4	ZC1	152.46	173.98	21.52	155.25	<b>87.04 %</b>
	ZC 2*	67.47	80.68	13.21	69.07	<b>87.83 %</b>
	ZC 3	50.61	63.38	12.77	52.37	<b>86.25 %</b>
	ZC 4**	51.62	69.54	17.93	53.76	<b>88.02 %</b>
	VV 1	106.73	121.41	14.68	110.54	<b>74.04 %</b>
	VV 2*	96.93	113.12	16.19	100.49	<b>78.00 %</b>
	VV 3	95.56	112.64	17.07	98.58	<b>82.32 %</b>
	VV 4**	104.21	126.86	22.65	110.21	<b>73.51 %</b>
5	ZC1	3.54	25.08	21.54	6.10	<b>88.14 %</b>
	ZC 2*	3.54	24.37	20.83	5.98	<b>88.30 %</b>
	ZC 3	3.50	49.07	45.56	8.72	<b>88.55 %</b>
	ZC 4**	3.52	15.39	11.87	5.45	<b>83.76 %</b>
	VV 1	3.53	39.17	35.64	9.39	<b>83.56 %</b>
	VV 2*	3.53	42.17	38.64	11.62	<b>79.05 %</b>
	VV 3	3.52	44.16	40.64	12.82	<b>77.11 %</b>
	VV 4**	3.52	44.96	41.44	12.98	<b>77.18 %</b>
6	ZC1	3.54	11.91	8.37	4.58	<b>87.64 %</b>
	ZC 2*	3.54	15.86	12.32	5.06	<b>87.71 %</b>
	ZC 3	3.52	20.53	17.01	5.97	<b>85.62 %</b>
	ZC 4**	3.55	10.00	6.45	4.62	<b>83.50 %</b>



	VV 1	3.53	14.18	10.65	6.46	<b>72.46</b>	%
	VV 2*	3.53	8.63	5.10	4.99	<b>71.36</b>	%
	VV 3	3.52	25.59	22.07	9.75	<b>71.80</b>	%
	VV 4**	3.52	16.29	12.77	6.58	<b>76.09</b>	%
7	ZC1	3.59	23.79	20.20	6.01	<b>88.00</b>	%
	ZC 2*	3.58	22.62	19.04	6.65	<b>83.88</b>	%
	ZC 3	3.54	35.46	31.92	8.09	<b>85.76</b>	%
	ZC 4**	3.54	24.54	21.00	6.84	<b>84.29</b>	%
	VV 1	3.55	15.54	11.99	6.33	<b>76.79</b>	%
	VV 2*	3.55	21.11	17.56	7.90	<b>75.22</b>	%
	VV 3	3.53	46.66	43.13	14.90	<b>73.64</b>	%
	VV 4**	3.54	28.42	24.88	9.82	<b>74.75</b>	%
9	ZC1	3.50	36.19	32.69	7.31	<b>88.33</b>	%
	ZC 2*	3.44	27.23	23.80	7.54	<b>82.74</b>	%
	ZC 3	3.44	31.50	28.06	7.96	<b>83.90</b>	%
	ZC 4**	3.50	31.73	28.23	7.81	<b>84.73</b>	%
	VV 1	3.50	29.67	26.17	9.58	<b>76.77</b>	%
	VV 2*	3.45	32.22	28.77	9.62	<b>78.54</b>	%
	VV 3	3.46	34.38	30.92	11.48	<b>74.06</b>	%
	VV 4**	3.50	40.22	36.72	12.76	<b>74.77</b>	%
10	ZC1	3.50	45.58	42.08	9.22	<b>86.39</b>	%
	ZC 2*	3.44	26.05	22.61	7.43	<b>82.32</b>	%
	ZC 3	3.44	43.86	40.42	9.75	<b>84.40</b>	%
	ZC 4**	3.50	47.06	43.56	10.61	<b>83.67</b>	%
	VV 1	3.50	40.90	37.40	13.33	<b>73.73</b>	%
	VV 2*	3.44	45.28	41.83	14.02	<b>74.72</b>	%
	VV 3	3.46	51.98	48.53	15.99	<b>74.18</b>	%
	VV 4**	3.50	53.80	50.30	16.43	<b>74.28</b>	%
11	ZC1	3.55	45.34	41.79	9.15	<b>86.59</b>	%
	ZC 2*	3.46	21.94	18.48	6.94	<b>81.16</b>	%
	ZC 3	3.48	36.16	32.68	9.03	<b>83.01</b>	%
	ZC 4**	3.53	29.77	26.24	8.67	<b>80.42</b>	%
	VV 1	3.51	23.44	19.93	8.55	<b>74.71</b>	%
	VV 2*	3.49	38.95	35.46	12.64	<b>74.18</b>	%
	VV 3	3.49	45.39	41.90	14.59	<b>73.51</b>	%
	VV 4**	3.53	36.42	32.89	12.52	<b>72.66</b>	%
12	ZC1	3.64	27.99	24.36	7.90	<b>82.48</b>	%
	ZC 2*	3.47	33.43	29.96	10.47	<b>76.63</b>	%
	ZC 3	3.54	30.76	27.22	9.05	<b>79.75</b>	%
	ZC 4**	3.62	29.54	25.92	9.12	<b>78.79</b>	%
	VV 1	3.51	23.12	19.61	10.01	<b>66.86</b>	%
	VV 2*	3.47	29.30	25.82	11.60	<b>68.52</b>	%
	VV 3	3.50	33.85	30.34	12.93	<b>68.93</b>	%
	VV 4**	3.53	48.98	45.45	19.01	<b>65.96</b>	%
22	ZC1	19.77	25.27	5.50	20.80	<b>81.34</b>	%
	ZC 2*	32.84	38.77	5.93	34.31	<b>75.19</b>	%
	ZC 3	26.93	33.37	6.44	28.40	<b>77.08</b>	%
	ZC 4**	39.86	47.50	7.64	41.46	<b>79.14</b>	%
	VV 1	30.49	39.25	8.75	33.15	<b>69.68</b>	%
	VV 2*	38.86	46.71	7.85	41.35	<b>68.22</b>	%
	VV 3	26.90	38.53	11.63	30.77	<b>66.72</b>	%
	VV 4**	38.74	46.59	7.85	41.17	<b>69.03</b>	%

\* Réplica de ZC1 o VV1 (tratamientos con relación 1:2),\*\*Réplica de ZC3 o VV3 (tratamientos con relación 1:1)



Resumen de la tabla del porcentaje de humedad:

SEMANA	% DE HUMEDAD											
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	22
ZC1	82.77	84.19	87.22	87.04	88.14	87.64	88.00	88.33	86.39	86.59	82.48	81.34
ZC 2*	80.68	86.13	83.79	87.83	88.30	87.71	83.88	82.74	82.32	81.16	76.63	75.19
ZC 3	83.95	78.19	82.48	86.25	88.55	85.62	85.76	83.90	84.40	83.01	79.75	77.08
ZC 4**	80.03	85.62	84.42	88.02	83.76	83.50	84.29	84.73	83.67	80.42	78.79	79.14
VV 1	77.88	79.84	80.65	74.04	83.56	72.46	76.79	76.77	73.73	74.71	66.86	69.68
VV 2*	78.88	81.60	80.52	78.00	79.05	71.36	75.22	78.54	74.72	74.18	68.52	68.22
VV 3	77.59	74.74	73.60	82.32	77.11	71.80	73.64	74.06	74.18	73.51	68.93	66.72
VV 4**	76.65	77.31	76.34	73.51	77.18	76.09	74.75	74.77	74.28	72.66	65.96	69.03

• VALORES DE pH DE LA "COMPOSTA"

REACTOR	pH COMPOSTA											
	SEMANA											
	1	4	5	6	7	9	10	11	12	14	18	22
ZC 1	8.89	7.22	7.816	7.538	7.08	7.643	7.993	8.39	8.67	8.1	7.235	6.954
ZC 2*	8.86	7.382	7.265	7.003	6.676	6.993	7.373	7.446	8.234	7.567	7.181	6.956
ZC 3	8.54	7.288	7.732	7.65	7.003	7.46	7.76	8.087	8.437	7.987	7.272	6.96
ZC 4**	8.57	6.974	7.35	7.283	6.509	7.307	7.825	7.953	8.425	7.742	7.31	7.02
VV 1	8.51	6.437	6.317	6.29	5.979	6.273	6.692	6.811	7.8	7.457	6.94	6.67
VV 2*	8.78	6.631	6.513	6.51	6.128	6.662	6.782	7.253	7.9	7.514	6.892	6.58
VV 3	8.19	6.8	6.958	6.312	6.38	6.664	7.07	7.61	7.861	7.684	6.831	6.565
VV 4**	8.63	6.887	6.711	6.733	6.08	6.977	7.01	7.547	7.92	7.486	6.854	6.576

\* Réplica de ZC1 o VV1 (tratamientos con relación 1:2), \*\* Réplica de ZC3 o VV3 (tratamientos con relación 1:1)





• VALORES DE pH DE LIXIVIADOS

pH LIXIVIADOS					
REACTOR	SEMANA				
	1	4	5	6	7
ZC 1	8.91	7.671	8.281	7.382	8.237
ZC 2*	8.9	7.752	7.969	7.375	
ZC 3	8.7	7.15	8.006	7.703	8.264
ZC 4**	8.65	7.312	7.965	7.636	7.715
VV 1	8.5	6.69	7.401	6.772	
VV 2*	8.8	7.211	7.428	7.086	
VV 3	8.23	6.995	8.215	7.798	7.848
VV 4**	8.7	6.921	7.953	7.975	7.605

\* Réplica de ZC1 o VV1 (tratamientos con relación 1:2), \*\* Réplica de ZC3 o VV3 (tratamientos con relación 1:1)

• RELACIÓN C/N (Cálculos teóricos)

SEMANA	REACTOR	*PESO CÁPSULA (g)	*PESO MUESTRA SECA + CÁPSULA (g)	PESO MUESTRA SECA	*PESO CENIZAS + CÁPSULA) 110°C	PESO CENIZA	% CENIZA	% COT	% NITRÓGENO TOTAL	RELACIÓN C/N
0	ZC LODOS	26.44	28.73	2.28	27.83	1.38	60.57	21.91	%	13.62
	VV LODOS	25.84	30.03	4.19	28.98	3.14	75.01	13.88	%	14.77
1	ZC1	3.54	5.39	1.84	3.81	0.27	14.61	47.44	%	17.91
	ZC 2*	3.54	5.23	1.69	3.82	0.28	16.71	46.27	%	18.69
	ZC 3	3.50	5.16	1.66	3.83	0.33	19.64	44.64	%	21.95
	ZC 4**	3.52	5.67	2.14	3.82	0.29	13.68	47.96	%	18.71
	VV 1	3.53	5.76	2.23	4.49	0.96	43.20	31.56	%	20.26



	VV 2*	3.53	5.19	1.66	4.20	0.67	40.36	<b>33.13</b>	%	<b>1.54</b>	%	<b>21.53</b>
	VV 3	3.52	7.96	4.44	5.62	2.10	47.39	<b>29.23</b>	%	<b>1.47</b>	%	<b>19.92</b>
	VV 4**	3.52	8.55	5.02	6.35	2.83	56.26	<b>24.30</b>	%	<b>1.42</b>	%	<b>17.13</b>
7	ZC1	40.55	41.95	1.40	40.78	0.23	16.43	<b>46.43</b>	%	<b>3.14</b>	%	<b>14.78</b>
	ZC 2*	38.86	40.45	1.59	39.21	0.34	21.73	<b>43.48</b>	%	<b>3.43</b>	%	<b>12.69</b>
	ZC 3	52.37	55.12	2.75	53.18	0.82	29.68	<b>39.07</b>	%	<b>1.87</b>	%	<b>20.89</b>
	ZC 4**	38.74	40.94	2.20	39.11	0.37	16.97	<b>46.13</b>	%	<b>3.26</b>	%	<b>14.13</b>
				0.00								
	VV 1	30.50	32.26	1.76	31.26	0.77	43.62	<b>31.32</b>	%	<b>1.83</b>	%	<b>17.09</b>
	VV 2*	26.93	29.05	2.12	27.82	0.89	41.91	<b>32.27</b>	%	<b>1.74</b>	%	<b>18.56</b>
	VV 3	19.77	24.28	4.52	22.49	2.72	60.19	<b>22.11</b>	%	<b>1.15</b>	%	<b>19.31</b>
	VV 4**	26.91	30.10	3.20	28.66	1.76	54.89	<b>25.06</b>	%	<b>1.59</b>	%	<b>15.75</b>
12	ZC1	19.76	22.67	2.91	20.38	0.62	21.33	<b>43.70</b>	%	<b>3.49</b>	%	<b>12.54</b>
	ZC 2*	38.73	42.67	3.94	39.51	0.78	19.73	<b>44.59</b>	%	<b>3.63</b>	%	<b>12.28</b>
	ZC 3	30.49	33.64	3.15	31.28	0.79	24.97	<b>41.68</b>	%	<b>3.30</b>	%	<b>12.65</b>
	ZC 4**	39.85	43.37	3.52	40.44	0.59	16.81	<b>46.22</b>	%	<b>3.27</b>	%	<b>14.12</b>
	VV 1	26.93	31.88	4.95	29.20	2.27	45.87	<b>30.07</b>	%	<b>2.42</b>	%	<b>12.43</b>
	VV 2*	29.90	32.69	2.78	31.30	1.39	50.08	<b>27.74</b>	%	<b>1.86</b>	%	<b>14.93</b>
	VV 3	52.36	59.60	7.24	55.99	3.63	50.13	<b>27.71</b>	%	<b>1.79</b>	%	<b>15.47</b>
	VV 4**	40.54	47.08	6.54	44.43	3.89	59.46	<b>22.52</b>	%	<b>2.01</b>	%	<b>11.18</b>
22	ZC1	19.77	20.74	0.97	20.17	0.41	41.82	<b>32.32</b>	%	<b>3.02</b>		<b>10.69</b>
	ZC 2*	32.84	34.14	1.30	33.14	0.29	22.61	<b>42.99</b>	%	<b>4.42</b>		<b>9.73</b>
	ZC 3	26.93	28.24	1.32	27.33	0.40	30.36	<b>38.69</b>	%	<b>3.85</b>		<b>10.06</b>
	ZC 4**	39.86	41.38	1.51	40.13	0.27	17.66	<b>45.74</b>	%	<b>4.08</b>		<b>11.21</b>
	VV 1	30.49	32.99	2.50	31.43	0.94	37.52	<b>34.71</b>	%	<b>2.70</b>		<b>12.85</b>
	VV 2*	38.86	41.18	2.32	39.96	1.10	47.44	<b>29.20</b>	%	<b>1.92</b>		<b>15.18</b>
	VV 3	26.90	30.62	3.72	29.15	2.25	60.37	<b>22.02</b>	%	<b>1.40</b>		<b>15.67</b>
	VV 4**	38.74	41.02	2.28	40.05	1.31	57.54	<b>23.59</b>	%	<b>2.03</b>		<b>11.62</b>

\* Réplica de ZC1 o VV1 (tratamientos con relación 1:2),\*\*Réplica de ZC3 o VV3 (tratamientos con relación 1:1)



Resumen de la tabla de la relación C/N:

REACTOR	C/N			
	SEMANA 1	SEMANA 7	SEMANA 12	SEMANA 22
ZC1	17.91	14.78	12.54	10.69
ZC 2*	18.69	12.69	12.28	9.73
ZC 3	21.95	20.89	12.65	10.06
ZC 4**	18.71	14.13	14.12	11.21
VV 1	20.26	17.09	12.43	12.85
VV 2*	21.53	18.56	14.93	15.18
VV 3	19.92	19.31	15.47	15.67
VV 4**	17.13	15.75	11.18	11.62

\* Réplica de ZC1 o VV1 (tratamientos con relación 1:2),\*\*Réplica de ZC3 o VV3 (tratamientos con relación 1:1)

• **PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS**

REACTOR	ORIGEN DEL LODO PRIMARIO	COLIFORMES FCALES, NMP/100 cm <sup>3</sup>	HUEVOS DE HELMINTO HH/ g sólidos totales
<b>ZC Lodos</b>	Zona Cultural	3000000	245
<b>ZC 1 (1:2)</b>	Zona Cultural	30000	73
<b>ZC 3 (1:1)</b>	Zona Cultural	90000	77
<b>VV Lodos</b>	Vivero Forestal de Coyoacán	4000000	285
<b>VV 1 (1:2)</b>	Vivero Forestal de Coyoacán	150000	133
<b>VV 3 (1:1)</b>	Vivero Forestal de Coyoacán	30000	155

• **PLANTAS EMERGENTES**

CONTENIDO	No.	SEMILLA	PLANTAS EMERGENTES		
			Día 8	Día 11	FINAL
Sustrato puro	1	Maíz	16	16	<b>16</b>
Sustrato puro	2	Maíz	14	18	<b>18</b>
Sustrato puro	3	Maíz	14	16	<b>17</b>
Sustrato puro	1	Frijol	2	2	<b>9</b>
Sustrato puro	2	Frijol	2	2	<b>10</b>
Sustrato puro	3	Frijol	2	2	<b>16</b>
Sust + "composta"ZC	1	Maíz	15	19	<b>19</b>
Sust + "composta"ZC	2	Maíz	20	20	<b>20</b>
Sust + "composta"ZC	3	Maíz	18	18	<b>18</b>
Sust + "composta"ZC	1	Frijol	9	18	<b>18</b>
Sust + "composta"ZC	2	Frijol	7	17	<b>17</b>
Sust + "composta"ZC	3	Frijol	8	18	<b>18</b>



Sust + Lodo ZC	1	Maíz	0	0	<b>11</b>
Sust + Lodo ZC	2	Maíz	2	8	<b>19</b>
Sust + Lodo ZC	3	Maíz	7	7	<b>17</b>
Sust + Lodo ZC	1	Frijol	0	2	<b>2</b>
Sust + Lodo ZC	2	Frijol	4	10	<b>10</b>
Sust + Lodo ZC	3	Frijol	3	3	<b>3</b>
Composta ZC	1	Maíz	5	10	<b>13</b>
Composta ZC	2	Maíz	7	13	<b>17</b>
Composta ZC	3	Maíz	14	14	<b>19</b>
Composta ZC	1	Frijol	4	4	<b>16</b>
Composta ZC	2	Frijol	1	1	<b>12</b>
Composta ZC	3	Frijol	1	1	<b>10</b>
Lodos ZC	1	Maíz	1	14	<b>14</b>
Lodos ZC	2	Maíz	0	0	<b>0</b>
Lodos ZC	3	Maíz	4	15	<b>15</b>
Lodos ZC	1	Frijol	0	0	<b>0</b>
Lodos ZC	2	Frijol	0	0	<b>0</b>
Lodos ZC	3	Frijol	1	1	<b>1</b>
Sust + "composta" VV	1	Maíz	19	19	<b>19</b>
Sust + "composta" VV	2	Maíz	16	20	<b>20</b>
Sust + "composta" VV	3	Maíz	17	18	<b>18</b>
Sust + "composta" VV	1	Frijol	8	16	<b>16</b>
Sust + "composta" VV	2	Frijol	6	20	<b>20</b>
Sust + "composta" VV	3	Frijol	13	19	<b>19</b>
Sust + Lodo VV	1	Maíz	8	18	<b>18</b>
Sust + Lodo VV	2	Maíz	5	19	<b>19</b>
Sust + Lodo VV	3	Maíz	5	20	<b>20</b>
Sust + Lodo VV	1	Frijol	2	12	<b>12</b>
Sust + Lodo VV	2	Frijol	3	15	<b>15</b>
Sust + Lodo VV	3	Frijol	8	18	<b>18</b>
Composta VV	1	Maíz	4	4	<b>12</b>
Composta VV	2	Maíz	9	11	<b>16</b>
Composta VV	3	Maíz	4	4	<b>13</b>
Composta VV	1	Frijol	3	13	<b>12</b>
Composta VV	2	Frijol	2	3	<b>5</b>
Composta VV	3	Frijol	3	3	<b>4</b>
Lodos VV	1	Maíz	1	5	<b>5</b>
Lodos VV	2	Maíz	2	8	<b>8</b>
Lodos VV	3	Maíz	9	15	<b>15</b>
Lodos VV	1	Frijol	1	1	<b>1</b>
Lodos VV	2	Frijol	7	10	<b>10</b>
Lodos VV	3	Frijol	2	7	<b>7</b>



• ALTURAS DE LAS PLANTAS Y LONGITUD DE RAÍZ

CONTENIDO	No.	SEMILLA	ALTURAS (cm)				
			TALLO				RAÍZ
			Día 8	Día 19	Día 23	Día 28	Día 28
			FINAL	FINAL			
Sustrato puro	1	Maíz	3	13	18	<b>25.5</b>	<b>19</b>
Sustrato puro	2	Maíz	3	12	18.5	<b>25</b>	<b>19</b>
Sustrato puro	3	Maíz	3	14	21	<b>25</b>	<b>18</b>
Sustrato puro	1	Frijol	1	9.5	12	<b>16.5</b>	<b>14</b>
Sustrato puro	2	Frijol	1.5	10	11.5	<b>14</b>	<b>15</b>
Sustrato puro	3	Frijol	1	11.5	14	<b>14.5</b>	<b>15</b>
Sust + "composta" ZC	1	Maíz	3	20	28	<b>35</b>	<b>14</b>
Sust + "composta" ZC	2	Maíz	4	19.5	24	<b>33</b>	<b>17</b>
Sust + "composta" ZC	3	Maíz	4	20	28	<b>34</b>	<b>14</b>
Sust + "composta" ZC	1	Frijol	2	14	14	<b>16</b>	<b>11</b>
Sust + "composta" ZC	2	Frijol	3	14	14.5	<b>15</b>	<b>10</b>
Sust + "composta" ZC	3	Frijol	1.5	16	16	<b>16</b>	<b>9</b>
Sust + Lodo ZC	1	Maíz	-	13	18	<b>35</b>	<b>12</b>
Sust + Lodo ZC	2	Maíz	1.5	10.5	20	<b>30</b>	<b>14</b>
Sust + Lodo ZC	3	Maíz	1	15.5	19	<b>35</b>	<b>14</b>
Sust + Lodo ZC	1	Frijol	-	11.5	16	<b>22</b>	<b>15</b>
Sust + Lodo ZC	2	Frijol	1	11	16	<b>18.5</b>	<b>14</b>
Sust + Lodo ZC	3	Frijol	1	11.5	15.5	<b>18</b>	<b>10</b>
Composta ZC	1	Maíz	1.5	15	21	<b>23</b>	<b>11</b>
Composta ZC	2	Maíz	2	15	20	<b>30</b>	<b>13</b>
Composta ZC	3	Maíz	2.5	19	24	<b>30</b>	<b>16</b>
Composta ZC	1	Frijol	1	14	16	<b>17</b>	<b>8</b>
Composta ZC	2	Frijol	1	11	13	<b>15</b>	<b>10</b>
Composta ZC	3	Frijol	1	5	9	<b>16</b>	<b>9</b>
Lodos ZC	1	Maíz	0.5	19.5	20	<b>21</b>	<b>12</b>
Lodos ZC	2	Maíz	-	-	-	-	-
Lodos ZC	3	Maíz	1	20	20.5	<b>22</b>	<b>16</b>
Lodos ZC	1	Frijol	-	-	-	-	-
Lodos ZC	2	Frijol	-	-	-	-	-
Lodos ZC	3	Frijol	0.5	2	5	<b>7</b>	<b>1</b>
Sust + "composta" VV	1	Maíz	2	17	23	<b>27</b>	<b>15</b>
Sust + "composta" VV	2	Maíz	3	20	25	<b>29</b>	<b>18</b>
Sust + "composta" VV	3	Maíz	3	21	25	<b>28</b>	<b>18</b>
Sust + "composta" VV	1	Frijol	2.5	13	17.5	<b>19.5</b>	<b>10</b>
Sust + "composta" VV	2	Frijol	2	17	18	<b>21.5</b>	<b>8</b>
Sust + "composta" VV	3	Frijol	3	16	17	<b>20</b>	<b>12</b>



Sust + Lodo VV	1	Maíz	1	15	18	<b>25</b>	<b>13</b>
Sust + Lodo VV	2	Maíz	1	12	18.5	<b>27</b>	<b>15</b>
Sust + Lodo VV	3	Maíz	0.5	14	20	<b>30</b>	<b>14</b>
Sust + Lodo VV	1	Frijol	1.5	10.5	14.5	<b>19</b>	<b>11</b>
Sust + Lodo VV	2	Frijol	1	13	16	<b>17</b>	<b>11</b>
Sust + Lodo VV	3	Frijol	1.5	12	13	<b>19.5</b>	<b>8</b>
Composta VV	1	Maíz	2	14	17	<b>22</b>	<b>10</b>
Composta VV	2	Maíz	2	16	21	<b>28</b>	<b>15</b>
Composta VV	3	Maíz	1.5	14	18	<b>25</b>	<b>13</b>
Composta VV	1	Frijol	1	11	11.5	<b>14</b>	<b>6</b>
Composta VV	2	Frijol	1.5	12	16	<b>18.5</b>	<b>5</b>
Composta VV	3	Frijol	1	10	13	<b>18</b>	<b>6</b>
Lodos VV	1	Maíz	0.5	7	10	<b>11</b>	<b>10</b>
Lodos VV	2	Maíz	0.5	10	11	<b>13</b>	<b>10</b>
Lodos VV	3	Maíz	1	15	16	<b>20</b>	<b>14</b>
Lodos VV	1	Frijol	1	8	8.5	<b>10</b>	<b>3</b>
Lodos VV	2	Frijol	1	12.5	13	<b>14.5</b>	<b>4</b>
Lodos VV	3	Frijol	1	6.5	7	<b>8</b>	<b>3</b>



## ANEXO 6

### ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

#### A6.1 Análisis estadístico de los valores obtenidos

Por medio del análisis de varianza se obtuvo la F de Fisher y la P de la probabilidad la cual debe tenerse un valor numérico menor a 0.05 para que sí existan diferencias significativas.

#### % DE REDUCCIÓN DE PESO Y VOLUMEN

			% REDUCCIÓN DE PESO	% REDUCCIÓN DE VOLUMEN	
<b>Para ZC</b>					
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F		0.15	1.8	No son menores de 0.05 por lo que no existen diferencias significativas
Probabilidad	Valor de P		0.738	0.311	
<b>Para VV</b>					
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F		0.33	7.99	No son menores de 0.05 por lo que no existen diferencias significativas
Probabilidad	Valor de P		0.621	0.105	

#### TEMPERATURA

		DÍAS													
		5	6	8	9	12	13	14	16	19	20	21	22	23	26
<b>Para ZC</b>															
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	1	0	1	2	-	1	1	0	1	-	1	0	1	-
Probabilidad	Valor de P	0.4226	1	0.4226	0.2929	-	0.4226	0.4226	1	0.4226	-	0.4226	1	0.4226	-
Relación 1:1															
	Media x	29.5	29.5	-	26.5	-	24.5	-	27.5	-	-	25.5	25.5	-	-
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.7071	0.7071	-	0.7071	-	0.7071	-	0.7071	-	-	0.7071	0.7071	-	-



Relación 1:2	Media x	-	29.5	28.5	27.5	-	-	26.5	27.5	25.5	-	-	25.5	24.5	-	
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	-	0.7071	0.7071	0.7071	-	-	0.7071	0.7071	0.7071	-	-	0.7071	0.7071	-	
		<b>DÍAS</b>														
<b>Para ZC</b>		27	29	33	34	36	37	40	41	43	44	47	48	50	51	68
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	1	2	-	-	1	-	1	1.8	0.2	0.5	0	-	.2	0	-
Probabilidad	Valor de P	0.423	0.293	-	-	0.423	-	0.423	0.312	0.699	0.553	1	-	.6985	1	-
Relación 1:1	Media x	-	25.25	-	-	-	-	-	28.25	30.5	31	28.5	28.5	-	28.25	27.5
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	-	0.354	-	-	-	-	-	0.354	0.707	0.707	0.707	0.707	-	0.354	0.707
Relación 1:2	Media x	24.75	24.75	-	-	24.5	-	27.5	27.5	30	30.5	28.5	28.5	-	28.5	27.5
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.354	0.354	-	-	0.707	-	0.707	0.707	1.414	0.707	0.707	0.707	-	0.707	0.707
		<b>DÍAS</b>														
<b>Para VV</b>		5	6	8	9	12	13	14	16	19	20	21	22	23	26	
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	0	1	1	2	1	-	2	0	9	1	9	-	5	-	
Probabilidad	Valor de P	1	0.4226	0.4226	0.2929	0.4226	-	0.6985	1	0.0955	0.4226	0.0955	-	0.1548	-	
Relación 1:1	Media x	30	30	-	27.5	26	-	27.25	28	26.75	-	-	-	25.5	-	
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	1.4142	1.4142	-	0.7071	1.4142	-	0.3536	1.4142	0.3536	-	-	-	0.7071	-	
Relación 1:2	Media x	-	-	30.25	28.5	-	-	27.5	28	-	23.5	25.25	-	24.25	-	
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	-	-	0.3536	0.7071	-	-	0.7071	1.4142	-	0.7071	0.3536	-	0.3536	-	





		<b>DÍAS</b>																		
<b>Para VV</b>		27	29	33	34	36	37	40	41	43	44	47	48	50	51	68	81	85	88	90
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	-	9	1	9	1	-	1	2	9	-	-	-	-	-	-	2	0	-	-
Probabilidad	Valor de P	-	0.0955	0.4226	0.0955	0.4226	-	0.4226	0.2929	0.0955	-	-	-	-	-	-	0.699	1	-	-
Relación 1:1	Media x	-	-	-	-	-	-	-	28.5	30.75	-	-	-	-	-	-	27.5	24.5	-	-
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	-	-	-	-	-	-	-	0.7071	0.3536	-	-	-	-	-	-	0.707	0.707	-	-
Relación 1:2	Media x	-	25.25	24.5	24.25	24.75	-	29	27.5	-	-	-	-	-	-	-	27.25	24.5	-	-
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	-	0.3536	0.7071	0.3536	0.3536	-	1.4142	0.7071	-	-	-	-	-	-	-	0.354	0.707	-	-

**% DE HUMEDAD**

<b>Para ZC</b>		<b>SEMANAS</b>											
		1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	22
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	0.010	0.720	1.080	0.100	0.740	8.620	0.170	0.190	0.020	0.520	0.010	0.000
Probabilidad	Valor de P	0.916	0.486	0.408	0.787	0.480	0.099	0.716	0.708	0.889	0.547	0.932	0.965
Relación 1:1	Media x	81.991	81.908	83.453	87.139	86.158	84.564	85.027	84.315	84.032	81.714	79.269	78.109
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	2.770	5.253	1.370	1.251	3.388	1.498	1.037	0.590	0.515	1.827	0.682	1.453
Relación 1:2	Media x	81.727	85.160	85.504	87.438	88.219	87.675	85.940	85.535	84.358	83.878	79.555	78.269
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	1.476	1.365	2.430	0.561	0.109	0.050	2.908	3.951	2.879	3.842	4.136	4.347



Para VV		SEMANAS											
		1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	22
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	3.380	9.130	16.730	0.150	3.400	0.850	3.540	11.550	0.000	7.460	0.020	0.620
Probabilidad	Valor de P	0.208	0.094	0.055	0.732	0.206	0.455	0.201	0.077	0.994	0.112	0.898	0.513
Relación 1:1	Media x	77.122	76.025	74.973	77.916	77.144	73.947	74.199	74.415	74.229	73.083	67.442	67.876
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.663	1.813	1.937	6.234	0.053	3.036	0.787	0.508	0.074	0.600	2.102	1.627
Relación 1:2	Media x	78.383	80.721	80.583	76.018	81.307	71.908	76.007	77.657	74.224	74.444	67.689	68.950
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.709	1.242	0.093	2.796	3.192	0.775	1.107	1.249	0.703	0.369	1.172	1.029

**pH DE LAS "COMPOSTAS"**

Para ZC		SEMANAS											
		1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	22
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	227.560	0.930	0.000	0.370	0.150	0.040	0.120	0.050	0.010	0.010	7.050	1.360
Probabilidad	Valor de P	0.004	0.437	0.999	0.607	0.739	0.863	0.759	0.850	0.932	0.926	0.117	0.364
Significancia		<u>Sí a 5% y 1%</u>											
Relación 1:1	Media x	8.555	7.131	7.541	7.467	6.756	7.384	7.793	8.020	8.431	7.865	7.290	6.990
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.021	0.222	0.270	0.260	0.349	0.108	0.046	0.095	0.008	0.173	0.028	0.042
Relación 1:2	Media x	8.875	7.301	7.541	7.271	6.878	7.318	7.683	7.918	8.452	7.834	7.205	6.955
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.021	0.115	0.390	0.378	0.286	0.460	0.438	0.668	0.308	0.377	0.035	0.001



Para VV		SEMANAS											
		1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	22
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	0.830	8.480	7.080	0.270	1.110	2.000	31.390	5.990	0.490	0.930	7.760	1.450
Probabilidad	Valor de P	0.459	0.101	0.117	0.657	0.403	0.293	0.030	0.134	0.558	0.436	0.108	0.352
Significancia		<u>Sí a 5%</u>											
Relación 1:1	Media x	8.410	6.844	6.835	6.523	6.230	6.821	7.040	7.579	7.891	7.585	6.840	6.571
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.311	0.062	0.175	0.298	0.212	0.221	0.042	0.045	0.042	0.140	0.014	0.008
Relación 1:2	Media x	8.645	6.534	6.415	6.400	6.054	6.468	6.737	7.032	7.850	7.486	6.915	6.625
	Desviación estándar (s o $\sigma$ )	0.191	0.137	0.139	0.156	0.105	0.275	0.064	0.313	0.071	0.040	0.035	0.064

### pH DE LOS LIXIVIADOS

Para ZC		1	4	5	6	7
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	81.38	28.15	0.79	74.64	
Probabilidad	Valor de P	0.012	0.034	0.469	0.013	
Significancia		<u>Sí a 5%</u>	<u>Sí a 5%</u>		<u>Sí a 5%</u>	
Relación 1:1	Media x	8.675	7.231	7.985	7.669	7.989
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	0.035	0.114	0.029	0.047	0.388
Relación 1:2	Media x	8.905	7.711	8.125	7.378	
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	0.007	0.057	0.220	0.005	



<b>Para VV</b>		1	4	5	6	7
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	0.44	0	25.84		
Probabilidad Significancia	Valor de P	0.575	0.980	0.036		
				<u>Sí a 5%</u>		
Relación 1:1	Media x	8.465	6.958	8.084	7.886	7.726
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	0.332	0.052	0.185	0.125	0.171
Relación 1:2	Media x	8.65	6.9505	7.4145	6.929	
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	0.212	0.368	0.019	0.222	

**RELACIÓN C/N**

<b>Para ZC</b>		SEMANA 1	SEMANA 7	SEMANA 12	SEMANA 22
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	1.49	1.14	1.17	0.32
Probabilidad	Valor de P	0.347	0.3972	0.3214	0.6276
Relación 1:1	Media x	20.329	17.512	13.383	10.635
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	2.292	4.780	1.038	0.813
Relación 1:2	Media x	18.296	13.732	12.408	10.21
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	0.553	1.477	0.186	0.679

<b>Para VV</b>					
Fisher (Estadístico de prueba F)	Valor de F	2.38	0.02	0.02	0.03
Probabilidad	Valor de P	0.263	0.894	0.9	0.888



Relación 1:1	Media x	18.527	17.533	13.326	13.645
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	1.974	2.518	3.035	2.864
Relación 1:2	Media x	20.892	17.824	13.679	14.015
	Desvío estándar (s o $\sigma$ )	0.896	1.039	1.767	1.647



## A6.2 Comparación de los tratamientos a la entrada y a la salida de los parámetros de "composta"

### • MASA

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	4.50	4.50	6.00	6.00				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	2.96	3.08	3.42	4.29					
Diferencia	1.536	1.424	2.577	1.707	1.811	0.5237576	6.9154131	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	4.50	4.50	6.00	6.00				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	2.94	2.27	3.83	3.64					
Diferencia	1.559	2.235	2.168	2.358	2.08	0.3561339	11.681001	3.182	5.841

### • VOLUMEN

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	0.02	0.02	0.02	0.02				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	0.00	0.00	0.00	0.00					
Diferencia	0.02	0.02	0.02	0.01	0.0153	0.0004	76.6904	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	0.02	0.02	0.02	0.02				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	0.01	0.00	0.01	0.01					
Diferencia	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0137	0.0008	33.3076	3.182	5.841



• TEMPERATURAS

Día	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	30	30	30	30				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
90	26	26	27	27					
Diferencia	4	4	3	3	3.5	0.5773	12.1243	3.182	5.841

Día	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	30	30	31	29				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
90	27	27	27	27					
Diferencia	3	3	4	2	3	0.8164	7.3484	3.182	5.841

• % DE HUMEDAD

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	8.890	8.860	8.540	8.570				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	6.954	6.956	6.960	7.020					
Diferencia	1.936	1.904	1.580	1.550	1.743	0.206	16.939	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	77.881	78.884	77.590	76.653				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	69.677	68.222	66.725	69.026					
Diferencia	8.203	10.662	10.865	7.627	9.339	1.663	11.231	3.182	5.841



• pH "COMPOSTA"

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	8.890	8.860	8.540	8.570				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	6.954	6.956	6.960	7.020					
Diferencia	1.936	1.904	1.580	1.550	1.743	0.206	16.939	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	8.510	8.780	8.190	8.630				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	6.670	6.580	6.565	6.576					
Diferencia	1.840	2.200	1.625	2.054	1.930	0.251	15.360	3.182	5.841

• pH LIXIVIADO

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	8.910	8.900	8.700	8.650				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
6	7.382	7.375	7.703	7.636					
Diferencia	1.528	1.525	0.997	1.014	1.266	0.301	8.415	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	8.500	8.800	8.230	8.700				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
6	6.772	7.086	7.798	7.975					
Diferencia	1.728	1.714	0.432	0.725	1.150	0.670	3.430	3.182	5.841





• **RELACIÓN C/N**

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	17.905	18.687	21.950	18.708				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	10.685	9.726	10.056	11.214					
Diferencia	7.220	8.961	11.895	7.493	8.892	2.143	8.300	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	20.259	21.526	19.924	17.131				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	12.845	15.185	15.673	11.616					
Diferencia	7.414	6.342	4.251	5.515	5.880	1.336	8.805	3.182	5.841

• **COLIFORMES FECALES**

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	3000000	3000000	3000000	3000000				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	30000	70000	90000	150000					
Diferencia	2970000	2930000	2910000	2850000	2915000	50000	116.600	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos				
	VV1	VV2	VV3	VV4	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	4000000	4000000	4000000	4000000				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	150000	200000	30000	90000					
Diferencia	3850000	3800000	3970000	3910000	3882500	73654.599	105.425	3.182	5.841



• HUEVOS DE HELMINTOS

	Reactores				Parámetros estadísticos		
	ZC1	ZC3	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	490	490				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	147	155					
Diferencia	343	335	339	5.657	84.75	3.182	5.841

	Reactores				Parámetros estadísticos		
	VV1	VV3	Media	Desviación estándar	t-calculada	t-tabla	
1	570	570				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
22	267	310					
Diferencia	303	260	281.5	30.405	13.093	3.182	5.841



## ANEXO 7

### CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN LECHO DE SECADO

Considerando las especificaciones de construcción de la EPA (1979), el tiempo de retención de los lechos de secado es de 90 días y el diseño se considera con la cantidad de lodos generados por el sistema, la altura según las especificaciones es de 0.30 m.

Para tratar 1244.31 kg de lodo húmedo se requiere un lecho de secado de lodos de las siguientes dimensiones (considerando que su contenido de humedad hace que la densidad sea la del agua  $1000 \text{ kgm}^{-3}$ ):

$$V_{\text{LECHO DE SECADO}} = 1.244 \text{ m}^3$$

$$h = 0.30 \text{ m}$$

$$L = 2.1 \text{ m}$$

$$L = 2.1 \text{ m}$$

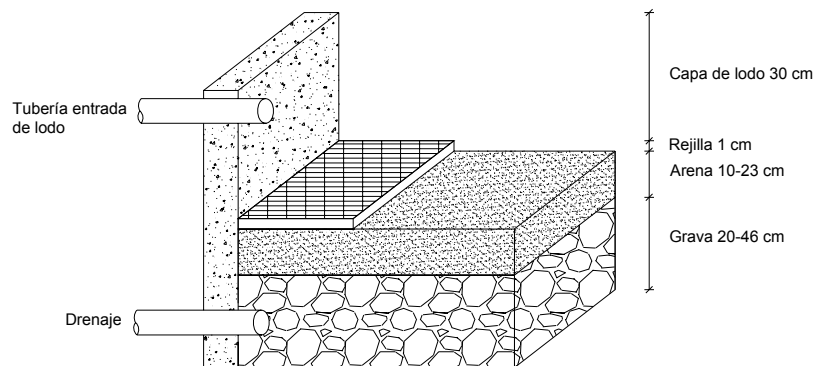


Figura A7-1. Corte transversal de un lecho de secado de lodos



## BIBLIOGRAFÍA

Acosta, Y., Ramírez, E. y Gutiérrez, E. 2000. Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas. Universidad de Zulia. Maracaibo, Venezuela.

APHA, AWWA, WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation). 17ª Ed. Ediciones Díaz Santos S.A. Madrid, España.

Ávila, J., Colmenárez, O., Marcano, E.; Acevedo, T., Flores, R. y Gutiérrez, L. 2003. Las siembras tardías reducen los rendimientos en ajonjolí. Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa. Acarigua, Venezuela.

Ayuso, M., Hernández, T., Costa, F., García, C. y Pascual, J. 1992. Influencia del grado de madurez de un residuo urbano sobre la germinación y disponibilidad de nitrógeno. Suelo y planta. 2:517-527.

Bernal, M.; Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A. y Cegarra, J. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. Bioresource Technology. 63:91-99.

Berton, R., Camargo, O. y Valadares, J. 1989. Absorcao de nutrientes pelo milho em desposta a adicto a lodo de esgoto a cinco solos paulistas. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 13:187-192.

Breitenbeck, G. y Schellinger, D. 2004. Calculating the reduction in material mass and volume during composting. Rev. Compost Science & Utilization. 12(4):365-371.

Castillo, G., Alcota, C. y Mena, M.P. 2000. Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Cogger, C. y Sullivan, D. 2001. Backyard composting. College of Agriculture and Home Economics. Washington State University. EEUU.

Defrieri, R.; Jiménez, M, Efron, D. y Palma, M. 2005. Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. Revista Científica Agriscientia, XXII (1):25-31.

Department of Environment. 2005. Saidapet, Chennai. Tamada de las redes internacionales: <http://www.environment.tn.nic.in>

DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana, NOM-004-Semarnat-2002. Lodos y Biosólidos - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.. *Diario Oficial de la Federación*. Poder Ejecutivo Federal. 18 de febrero de 2002. México, D.F., México.

DOF. 1984. Norma Mexicana, NMX-AA-025-1984. Determinación del pH-método potenciométrico. Protección al ambiente. Contaminación del suelo y residuos sólidos



municipales. *Diario Oficial de la Federación*. Poder Ejecutivo Federal. 10 de diciembre de 1984. México, D.F., México.

DOF. 1984. Norma Mexicana, NMX-AA-016-1984. Determinación de humedad en suelos. Protección al ambiente. Contaminación del suelo y residuos sólidos municipales. *Diario Oficial de la Federación*. Poder Ejecutivo Federal. 14 de diciembre de 1984. México, D.F., México.

EPA. 1998. An análisis of composting as an environmental remediation technology. Environmental Protection Agency. EPA530-R-98-008. Washington D.C. EEUU.

EPA, 1979. Process design manual for sludge treatment and disposal. Environmental Protection Agency. EPA 625/1-79-011. Cincinnati, EEUU.

Esponda-Aguilar, P.L. 2001. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Estrada-Gómez, J.A., Estrada-Trejo, V., Hernández-Livera, A., Molina-Moreno, J.C. y Campos-Escudero, A. 2004. OTI, una nueva variedad de frijol para el Valle de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 27(1):115-116.

Francou, C., Poitrenaud, M. y Houot, S. 2005. Stabilization of organic matter during composting: Influence of process and feedstocks. *Compost Sci. Utilization.* 13(1):72-83.

Gajdos, R. 1997. Effects of two compost and seven commercial cultivation media on germination and yield. *Compost Sci. Util.* 5:16-36.

Gallizzi, K. 2003. Co-Composting reduces helminth eggs in fecal sludge: A field study in Kumasi, Ghana. 46 pp. Tomado de las redes internacionales (internet): <http://www.sandec.ch>

García, A., Beltrán, G., Uceda, M., Hermoso, M., González, P., Ordóñez, R. y Giraldez, J. 1999. Vegetation water (alpechín) application effects on soils and plants. *Acta Horticulturae.* 2:749-752.

Genevini, P.L., Adani, F. y Villa, C. 1996. Dairy cattle slurry and rice hull co-composting. En: *The science of composting. Part 1.* M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi, Eds. Ed. Blackie. Pp. 567-576. Glasgow, Gran Bretaña.

Georgacakis, D., Tsavdaris, A., Bakouli, J. y Symeonidis, S. 1996. Composting solid swine manure and lignite mixtures with selected plant residues. *Biores. Technol.* 56:195-200.

Golueke, C.G. 1977. Biological processing: composting and hidrolisis. En: *Handbook of solid waste management.* D.G. Wilson, Ed. van Nostrand Reinhold. Pp. 197-225. Nueva York, EEUU.

Golueke, C.G. 1972. *Composting: A study of the process and its principles.* JG Press Inc., Ed Emmaus-Penn. Nueva York, EEUU.



Gotass, H.B., 1956. Composting. Department of engineering. University of California. Berkeley, EEUU.

Guzmán-Aguirre, S. 2004. Evaluación del sistema de humedales artificiales en la eliminación de microorganismos patógenos en aguas residuales. Tesis profesional (Química de Alimentos). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Hadi Bux Leghari. 2000. Organic farming, composting: The basics. Tomado de las redes internacionales: <http://www.Pakissan.com>. Pakistan

Horak, P. 1992. Helminth eggs in the sludge from three sewage treatment plants in Czechoslovakia. *Folia Parasitol.* 39(2):153-157.

Horsley, P. 2004. Organic farming in Australia. Tomado de las redes internacionales: <http://www.rirdc.gov.au>

Iglesias-Jiménez, E. y Pérez-García, V. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity: A review. *Biological Wastes.* 27:115-142.

Instituto Nacional de Ecología. 2005. Tomado de las redes internacionales: <http://www.ine.gob.mx>

Íñiguez, G. y Vaca, P. 2001. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte IV. Biodegradación del intestino grueso de cerdos con bagazo de agave húmedo. *Rev. Int. Contam. Ambiental*, 17(2):109-116.

Klingel, F. 2001. Nam Dinh Urban Development Project. Septage Management Study. Nam Dinh, Vietnam, November 1st, 2001. EAWAG/SANDEC and Colenco (Vietnam).

Koottatep, T. y Surinkul, N. 2000. AIT – EAWAG/SANDEC field research on septage treatment in planted sludge drying beds. Field reports, unpublished.

Larousse. 2002. Diccionario ilustrado de ecología y medioambiente. SPES Editorial, S.L. P. 92. Barcelona, España.

Lau, A.K., Lo, K.V., Liao, P.H. y Yu, J.C. 1992. Aeration experiments for swine waste composting. *Biores. Technol.* 41:145-152.

Liang, C., Das, K. y McClendon R. 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Biores. Technol.* 86(2):131–137.

Liao, P.H., Vizcarra, A. T., Chen, A. y Lo, K.V. 1993. Composting separated solids swine manure. *J. Environ. Sci. Health.* A28:761-777.

Manahan, S.E. 2007. Introducción a la química ambiental. Coedición UNAM-Editorial Reverté. México D.F. y Barcelona, México y España. En prensa.

Manahan, S.E. 2000. Environmental Chemistry. Lewis, Boca Raton, FL, EEUU.



Maynard, A.A. 2000. Compost, the process and research. The Connecticut Agr. Experiment Sta. New Haven. Bull. 966. New Haven, EEUU.

McCallum, K., Keeling, A., Beckwith, C. y Kettlewell, P. 1998. Effects of green waste compost on spring wheat emergence and early growth. *Acta Horticulturae*. 469:313-318.

Metcalf y Eddy. 1991. Wastewater engineering: Treatment, disposal, and reuse. Tercera edición. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU.

Miralles-de-Imperial, R., Beltrán, E.M., Delgado, M.M., Beringola, M.L., Martín, J.V., Calvo, R.I. y Walter, I. 2002. Emergencia de seis cultivos tratados con lodo fresco y "compostado" de estaciones depuradoras. *Rev. Int. Contam. Ambiental*, 18(3):139-146.

Miralles-de-Imperial, R., De-la-Cuadra, C., Calvo, R.I. y Walter, I. 1994. Efecto de los lodos residuales sobre la germinación de semillas de diversos cultivos. En *Acta del III Congreso Internacional de Química de la ANQUE*. Vol. 1. Pp. 23-32. Madrid, España.

Montgomery, D.C. 1997. Diseño y análisis de experimentos. 4a Ed. John Wiley and Sons. Nueva York, EEUU.

Murillo, J., Cabrera, F. y López. 1993. Influencia de vinaza de remolacha concentrada y "despotasificada", sobre emergencia, producción de biomasa y contenido de nutrientes de "rye grass". *Invest. Prod. Prot. Veg.* 8:37-47.

Negro, M.J., Villa, F., Aibar, J., Alarcón, R., Ciria, P., Cristóbal, M.V., de Benito, A., García Martín, A., García Muriedas, G., Labrador, C., Lacasta, J.A., Lezaún, R., Meco, G., Pardo, M.L., Solano, C. Y Torner, C. 2000. Producción y gestión del compost. *Revista: Informaciones Técnicas*. Núm. 88. Dirección General de Tecnología Agraria, Aragón, Zaragoza, España.

Pascual, J.A.; Ayuso, M., García, C. y Hernández, T. 1997. Characterization of urban waste according to fertility and phytotoxicity parameters. *Waste Manag. Res.* 15:103-112.

Pawlowski, Z.S., Schultzberg, K. 1986. Ascariasis and sewage in Europe. En: *Epidemiological studies of risks associated with agricultural use of sewage sludge: knowledge and needs*. Block, J.C., ed. Pp. 83-93. Elsevier. Londres, Inglaterra.

Ramírez-Camperos, E. 2006. Comunicación personal. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.

Ramírez-Carrillo, H.F., 1998. Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. Tesis profesional, Ingeniería Química. F.E.S. Zaragoza, UNAM, México D.F. México.

Rodríguez, A. y Varela, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México D.F. México.



Rodríguez-Monroy, J. 2004. Estudio de la remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Sánchez, A. y Mayoral, J. 2003. Analítica de los resultados del compostaje casero. En XVIII Encuentros Estatales de Amantes de la Basura. Ed. Escola Universitària Politècnica del Medi Ambient, UAB. Mollet del Vallès. Nov. 22. Barcelona, España. Tomado de las redes internacionales: <http://www.compostadores.com>

Schwartzbrod, J. 2000. Consultancy report submitted to EAWAG/SANDEC, unpublished.

Sims, J. T. 1994. Animal waste management. En: Encyclopedia of agricultural science C.J. Arntzen y E. M. Ritter, Eds. Academic Press. Vol. 1, pp. 185-201. Nueva York, EEUU.

Sims, J., Vasilas, B. y Gborati, M. 1993. Effect of coal fly ash and co-composted sewage sludge on emergent and early growth of cover crops. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24:503-512.

Stott, R., Ayres, R., Lee, D. y Mara D. 1994. An experimental evaluation of potential risks to human health from parasitic nematodes in wastewaters treated in waste stabilization ponds and used for crop irrigation. University of Leeds, Dept. of Civil Engineering, Research Monograph No. 6.

Strauss, M., Drescher, S., Zurbrügg, C., Montangero, A., Cofie, O. y Drechsel P. 2003. Co-composting of Faecal Sludge and Municipal Organic Waste. SANDEC/EAWAG-IWMI (Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology/Dept. of Water and Sanitation in Developing Countries-International Water Management Institute). Ch-Duebendorf, Switzerland y Cantoments Accra, Ghana.

Sztern, D. y Pravia, M. A., 1999. Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos. Oficina de Planeamiento y Presupuesto, Unidad de Desarrollo Municipal. Pub. OPS, OMS. Febrero. Montevideo, Uruguay.