

00369



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ELABORACION DE COMPOSTA A PARTIR  
DE LODOS RESIDUALES

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS (EDAFOLOGIA)

P R E S E N T A :

LINA MARIA CARDOSO VIGUEROS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

DIRECTOR DE TESIS :  
M. C. ALFREDO ECHEGARAY ALEMAN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1993



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

Indice	I
Resumen	VIII
Introducción	IX
Justificación	IX
Objetivos	X
1 TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LODO RESIDUAL	1
1.1 <u>Origen y definición</u>	1
1.2 <u>Características contaminantes</u>	1
1.2.1 Contenido de patógenos	3
1.2.2 Contenido de metales pesados	3
1.2.3 Contenido de tóxicos orgánicos	5
1.2.4 Otros contaminantes	6
1.3 <u>Contenido de nutrimentos</u>	7
1.4 <u>Tratamiento del lodo residual</u>	7
1.4.1 Espesamiento	9
1.4.2 Estabilización	9
1.4.2.1 Digestión anaerobia	9
1.4.2.2 Digestión aerobia	10
1.4.2.3 Estabilización con cal	10
1.4.3 Cloración	10
1.4.4 Pasteurización	11
1.4.5 Acondicionamiento	11
1.4.6 Desaguado y secado	14
1.5 <u>Composteo</u>	14
1.5.1 Camellón	15
1.5.2 Pila estática	15
1.5.3 Reactor	15
1.6 <u>Aprovechamiento de lodo residual</u>	17
1.7 <u>Incineración</u>	17
1.8 <u>Relleno sanitario</u>	19
2 COMPOSTEO EN PILA ESTATICA	22
2.1 <u>Descripción de las etapas del proceso</u>	22
2.1.1 Mezclado	22
2.1.2 Etapa termofílica	24
2.1.3 Etapa de curado	24
2.1.4 Secado y cribado	24
2.1.5 Reciclo del material	24
2.1.6 Construcción de la pila estática	24
2.1.6.1 Pila estática individual	24
2.1.6.2 Pila estática extendida	26
2.2 <u>Factores que intervienen en el proceso de composteo</u>	29
2.2.1 Contenido de humedad y sólidos en la mezcla lodo-acondicionador	29
2.2.2 Relación carbono-nitrógeno (C:N)	29

2.2.3	Ventilación y oxígeno	29
2.2.4	Potencial de hidrógeno (pH)	30
2.2.5	Temperatura	30
2.2.6	Acondicionador	31
2.3	<u>Balance de masa y energía</u>	32
2.4	<u>Monitoreo</u>	32
2.4.1	Contenido de humedad	33
2.4.2	Registro de temperatura	33
2.4.3	Concentración de oxígeno	33
2.4.4	Control de olor	33
2.4.5	Análisis de nutrimentos y contaminantes	33
2.4.6	Estabilidad de la composta	34
2.5	<u>Equipo</u>	36
2.6	<u>Criterios para la selección del sitio de composteo</u>	37
2.7	<u>Area y distribución requeridas</u>	37
3	APROVECHAMIENTO DE COMPOSTA Y LODOS RESIDUALES	40
3.1	Factores reguladores del suelo	40
3.1.1	Potencial de hidrógeno	40
3.1.2	Capacidad de intercambio catiónico	42
3.1.3	Materia orgánica	42
3.1.4	Influencia de los microorganismos en la disponibilidad de los metales pesados	42
3.2	<u>Barrera suelo-planta</u>	44
3.3	<u>Camino de dispersión de los contaminantes en el suelo</u>	46
3.4	<u>Comportamiento de patógenos en el suelo</u>	48
3.4.1	Supervivencia	48
3.4.2	Movilidad	49
3.5	<u>Usos y recomendaciones</u>	51
3.5.1	Mercado potencial	51
3.5.2	Dosis recomendadas	52
4	CRITERIOS Y NORMAS PARA EL USO DE COMPOSTA Y LODOS RESIDUALES	56
4.1	<u>Criterios y normas existentes en México</u>	56
4.2	<u>Criterios y normas establecidos en Estados Unidos de América</u>	57
4.3	<u>Requerimientos del lodo residual para ser aplicado en suelo agrícola</u>	59
4.3.1	Reducción de patógenos	59
4.3.2	Concentración de metales pesados	62
4.3.3	Concentración de tóxicos orgánicos	63
4.3.4	Control de vectores	64
4.4	<u>Características físico-químicas requeridas en el suelo agrícola y forestal para la disposición de lodo y composta</u>	64
4.4.1	Potencial de hidrógeno (pH)	64
4.4.2	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	65
4.4.3	Materia orgánica (M.O.)	65

4.4.4	Profundidad del acuífero	65
4.4.5	Distancia de los sitios de aplicación a aguas superficiales	66
4.4.6	Distancia a pozos	67
4.4.7	Planicies de inundación	68
4.4.8	Límites estacionales	68
4.4.9	Proximidad a lugares recreativos	68
4.5	<u>Porcentajes agronómicos</u>	68
4.5.1	Nitrógeno y fósforo	68
4.5.2	Contaminantes	69
4.5.3	Porcentajes de aplicación de lodo en áreas forestales	69
4.6	<u>Monitoreo del suelo y del ambiente</u>	69
5	<u>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</u>	70
5.1	<u>Ubicación del sitio experimental</u>	70
5.2	<u>Caracterización de los materiales utilizados</u>	70
5.2.1	Lodo	70
5.2.2	Acondicionadores	76
5.3	<u>Descripción del equipo utilizado</u>	78
5.3.1	Equipo de ventilación	78
5.3.2	Registro y control de temperatura	78
5.4	<u>Selección de acondicionadores</u>	78
5.4.1	Características de las mezclas	80
5.5	<u>Planta Piloto</u>	80
5.6	<u>Operación y monitoreo del sistema</u>	83
5.7	<u>Análisis e interpretación de resultados</u>	85
5.7.1	Distribución de temperaturas	85
5.7.2	Remoción de microorganismos patógenos	85
5.7.3	Remoción de humedad y sólidos volátiles	89
5.7.4	Reducción de metales pesados	94
5.7.5	Reducción de tóxicos orgánicos	94
5.7.5.1	Hidrocarburos aromáticos polinucleares	94
5.7.5.2	Plaguicidas organoclorados	98
5.8	<u>Concentración de nutrientes en la composta</u>	100
5.8.1	Estabilidad de la composta	100
5.8.2	Potencial de hidrógeno (pH)	100
5.8.3	Materia orgánica (%M.O.)	103
5.8.4	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	103
5.8.5	Nutrientes principales	103
5.8.6	Micronutrientes	106
6	<u>EVALUACION DE LA COMPOSTA DE LODO RESIDUAL EN VIVERO</u>	107
6.1	<u>Metodología</u>	107
6.2	<u>Diseño experimental</u>	108
6.2.1	Distribución en campo	108
6.2.2	Análisis de varianza	109
6.3	<u>Resultados</u>	110
6.3.1	Registro de crecimiento de amaranta	110
6.3.2	Registro de crecimiento de aralia	112
6.3.3	Registro de crecimiento de bugambilia	118

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
7.1	<u>Remoción de contaminantes</u>	121
7.2	<u>Contenido de nutrimentos en la composta</u>	121
7.3	<u>Uso de composta como sustrato de vivero</u>	121
7.4	<u>Recomendaciones</u>	122

Bibliografía	123
--------------	-----

Anexo 1	Balance de masa y energía	128
Anexo 2	Porcentajes Agronómicos	135

#### INDICE DE LAMINAS

1	Origen del lodo residual	2
2	Tratamiento del lodo para su disposición y aplicación en suelo	8
3	Sistema de pasteurización de lodos residuales	12
4	Tamaño de partículas presentes en los lodos	13
5	Composteo en camellón	16
6	Composteo en pila estática	16
7	Composteo en reactor	16
8	Sección transversal de un horno de pisos múltiples	18
9	Relleno sanitario	20
10	Etapas básicas en el composteo de pila estática	23
11	Sistema de difusión para una pila individual	25
12	Pila estática extendida para composteo y curado	27
13	Sección transversal de una pila extendida que muestra una secuencia típica de la adición diaria de mezcla lodo-bagazo	28
14	Distribución de áreas de una planta de composteo	38
15	Disponibilidad de los elementos con relación al pH de la solución del suelo	41
16	Reacciones de la materia orgánica contenida en la composta con los metales pesados	43
17	Camino que siguen los metales pesados a través del suelo y de las plantas	47
18	Diagrama del difusor de pilas experimentales	79
19	Diagrama de la planta piloto de composteo	81
20	Puntos de medición de temperatura en las pilas experimentales	84
21	Temperaturas promedio máximas, Experimento 1	86
22	Perfil de temperaturas dentro de la pila de composteo	87
23	Remoción de microorganismos, Experimento 2	88
24	Remoción de microorganismos, Experimento 3	90
25	Porcentaje de sólidos volátiles en la pila de composteo, Experimento 2	91
26	Variación de humedad en la pila de composteo, Experimento 2	92

27	Correlación de parámetros sistema de composteo, Experimento 3	93
28	Concentración de hidrocarburos aromáticos polinucleares, en lodo y composta	96
29	Carcinogenicidad de hidrocarburos aromáticos, en lodo y composta	97
30	Concentración de plaguicidas organoclorados, en lodo y composta	99
31	Registro de altura para plantas de amaranta con sustrato de vivero y mezclas con composta	111
32	Registro del número de ramas en plantas de amaranta con sustrato de vivero y mezclas con composta	113
33(a) y (b)	Registro de altura para plantas de aralia en sustrato de vivero y mezclas de composta	114-115
34	Registro del número de hojas para plantas de aralia con sustrato de vivero y mezclas de compostas	117
35	Registro de altura para plantas de bugambilia con sustrato de vivero y mezclas de composta	119
36	Registro del número de brácteas florales para plantas de bugambilia con sustrato de vivero y mezclas de composta	120

#### INDICE DE CUADROS

1	Principales patógenos presentes en el agua y lodo residual	4
2	Concentración de metales pesados en lodos residuales	5
3	Concentración de tóxicos orgánicos en lodos residuales	6
4	Reducción de patógenos y estabilización de lodo residual con diferentes tratamientos	9
5	Tipos de relleno sanitario, características y volumen de lodo tratado	21
6	Materiales acondicionadores reportados como satisfactorios en las pruebas de composteo desarrolladas en Beltsville	31
7	Parámetros para el monitoreo del proceso de composteo	32
8	Parámetros fisicoquímicos y técnicas de análisis para el control del sistema de composteo	34
9	Maquinaria y equipo requeridos para el manejo de una planta de composteo de 20 ton de lodo residual	36
10	Sensibilidad de cultivos a la aplicación de metales pesados	45
11	Concentración máxima de metales tolerada por el ganado, en comparación con los niveles en forrajes	46
12	Supervivencia de patógenos en suelos y plantas	50
13(a) a 13(c)	Uso y dosis de aplicación de la composta de lodo residual para obtener beneficios fertilizantes y acondicionadores	53-55

14	Contaminantes y sus concentraciones máximas contenidos en la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-001/88 emitida por SEDUE	56
15	Procesos y condiciones de operación para lograr una reducción significativa de patógenos (PRSP)	60
16	Procesos y condiciones de operación para lograr una reducción adicional de patógenos (PRAP)	61
17	Remoción de patógenos obtenida con los procesos de reducción significativa de patógenos (PRSP) y con los de reducción adicional de patógenos (PRAP)	62
18	Clasificación de la calidad del lodo para aplicación agrícola de acuerdo a la concentración máxima permitida de metales pesados	63
19	Clasificación de la calidad del lodo para aplicación agrícola de acuerdo a las concentraciones máximas permitidas de tóxicos orgánicos	64
20	Concentraciones máximas de metales (kg/ha) permitidas en la aplicación al suelo de acuerdo a su capacidad de intercambio catiónico	65
21	Porcentajes de pendientes para la aplicación de lodo residual	66
22	Condiciones requeridas para la zona amortiguadora	67
23	Características físicas del lodo de ECCACIV	71
24	Composición química del lodo de ECCACIV	72
25	Concentración de metales pesados en el lodo de ECCACIV	73
26	Concentración de hidrocarburos aromáticos polinucleares	74
27	Toxicidad de compuestos orgánicos	75
28	Concentración de plaguicidas organoclorados en el lodo de ECCACIV	76
29	Caracterización fisicoquímica del lodo y acondicionadores	77
30	Características de las mezclas, Experimento 1	82
31	Características de las mezclas, Experimento 2	82
32	Características de las mezclas, Experimento 3	83
33	Concentración de metales pesados en lodo y compostas, comparados con los valores máximos permitidos por la EPA	94
34	Comparación de hidrocarburos aromáticos polinucleares en lodo y composta	95
35	Comparación de plaguicidas organoclorados en lodo y composta	98
36	(a) y (b) Cambios químicos del lodo en el proceso de composteo	101-102
37	Comparación del contenido de nutrimentos en abonos comunes con la composta de lodo residual	102
38	Composición orgánica y contenido de micronutrimentos en tres compostas de lodo	103
39	Distribución completamente al azar para prueba de composta residual	109
40	Distribución de las unidades experimentales en el vivero	109

41	Resumen del modelo de análisis de varianza para una distribución al azar	110
42	Altura alcanzada en cada tratamiento de la amaranta	112
43	Número de ramas desarrolladas con cada tratamiento para la amaranta	112
44	Altura alcanzada en cada tratamiento para la aralia	116
45	Número de hojas en cada tratamiento para la aralia	116
46	Altura desarrollada en cada tratamiento para la bugambilia	118
47	Brácteas florales desarrolladas en cada tratamiento para la bugambilia	118

## Resumen

El presente trabajo es parte del proyecto de Lodos Residuales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. El trabajo experimental se desarrolló en la Empresa para el Control de la Contaminación de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (ECCACIV). Esta planta trata las aguas residuales industriales de la región. Se encuentra ubicada en Jiutepec, Morelos. Los objetivos del estudio son: Elaborar mediante el composteo en pila estática un sustrato para vivero a partir de lodo residual; Analizar en sus componentes fisicoquímicos y microbiológicos, la calidad agrosanitaria de la composta; y Evaluar la eficiencia de la composta en el desarrollo y crecimiento de plantas ornamentales. La parte experimental consistió en tres ensayos. En los primeros dos se seleccionó el acondicionador y definieron los factores de control del sistema. El tercero comprobó la funcionalidad de las condiciones de control en el manejo de 10 toneladas de material. Los resultados fueron los siguientes: Remoción de coliformes fecales de 100% y enterococos focales de 78% con temperaturas entre 55 y 65°C; Dilución de metales pesados de 25 y 66%.; Reducción de algunos tóxicos orgánicos como, antraceno (97%), benzo (k) fluoranteno (100%), aldrín (100%) y alfa BHC (100%). Los análisis fisicoquímicos probaron que la composta tiene nutrimentos como nitrógeno (5%), fósforo (0.94%), potasio (0.36%) y materia orgánica (48.24%). Las pruebas de la composta, como sustrato para el crecimiento de plantas ornamentales, no señalan diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, esto no significa que no existan diferencias reales entre ellos. Se refleja un porcentaje mayor de crecimiento en los tratamientos, que en los testigos. Se concluye que el composteo es técnicamente factible de ser utilizado para el tratamiento de lodo. En lodos de efluentes industriales, como los generados por ECCACIV, la composta debe usarse sólo en el cultivo de plantas ornamentales.

## **Introducción**

En México, los principales sistemas de tratamiento de agua residual que se utilizan son convencionales, tanto de lodos activados como de filtros biológicos. Estos sistemas tienen como desecho el lodo residual, en el que se depositan los contaminantes removidos como patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos.

En el país, los lodos se disponen en las corrientes de agua superficiales, basureros a cielo abierto o rellenos sanitarios lo que provoca contaminación en el aire, suelo y acuífero.

La disposición final que se da a los lodos, en otros países, sigue dos tendencias opuestas. Una consiste en desechar el producto y la otra en su uso como abono para cultivos, corrector de suelo y recuperación de áreas erosionadas.

La utilización del lodo incluye una infraestructura tecnológica costosa, pero se justifica porque soluciona un problema de contaminación, convirtiendo un desecho ambientalmente peligroso, en un recurso económico.

## **Justificación**

De los trabajos realizados durante los años de 1987 a 1988 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se concluyó que el composteo es adecuado para el manejo de lodos. Sin embargo, se requería de más investigación para poder implantar el proceso a las condiciones del país.

En este momento México no cuenta con una planta de composteo de lodos, que proporcione información de la eficiencia del procedimiento en la remoción de contaminantes. Además es necesario obtener parámetros para un proyecto en gran escala.

Por otra parte, la demanda de abonos para la agricultura y el cultivo de plantas de ornato, se incrementa. La composta se caracteriza por un elevado contenido de materia orgánica, su aprovechamiento ayudaría a sustituir los suelos forestales que son usados en viveros.

Con el desarrollo de esta tecnología, se podrá aprovechar un desecho y su comercialización permite recuperar los costos que genera el tratamiento.

## **Objetivos**

El presente trabajo tiene como objetivos generales, los siguientes:

- Elaborar, mediante el composteo en pila estática, un sustrato para vivero a partir de lodo residual.
- Analizar, en sus componentes fisicoquímicos y microbiológicos, la calidad agrosanitaria de la composta.
- Evaluar la eficiencia del producto en el desarrollo y crecimiento de plantas ornamentales.

## **Objetivos específicos**

- Evaluar desechos agroindustriales como acondicionadores, analizando su contenido de humedad, sólidos volátiles, capacidad calorífica y densidad, características que determinan su compostabilidad.
- Establecer las condiciones de manejo de una pila estática: oxígeno, temperatura, sólidos, relación carbono/nitrógeno y porosidad en la mezcla.

## 1 TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS RESIDUALES

### 1.1 Origen y definición

El origen de este desecho se ubica a partir de la recolección del agua residual proveniente de ciudades e industrias. Esta antes de ser descargada a los ríos debe ser tratada para prevenir la contaminación.

Los tratamientos de agua residual utilizados consisten de uno o más procedimientos físicos, químicos y biológicos. Están divididos en: primarios, como la sedimentación de sólidos, que remueve del 50 al 60% de los sólidos totales, y los secundarios que incluyen sistemas biológicos. Existen otros métodos adicionales para poder obtener un efluente de alta calidad, los tratamientos terciarios.

El lodo residual es por lo tanto, el producto de desecho en el tratamiento convencional del agua residual. Lo constituyen los sólidos sedimentables y no sedimentables, que por medio de la coagulación química, de la floculación biológica y la precipitación son extraídos de los tanques de sedimentación, Maskew, et al., 1954.

La calidad del lodo depende del origen del agua y del tratamiento utilizado. En la lámina 1, se observan su origen, sus principales tratamientos y su destino final: disposición por medio de incineración o relleno sanitario, o bien el aprovechamiento como abono agrícola.

### 1.2 Características contaminantes

Los componentes del lodo son muy heterogéneos y su contenido depende no sólo del origen del agua, sino también de la tecnología de tratamiento empleada y de la época del año (población, condiciones climatológicas, etc.), Felipo, et al., 1981.

Diferentes tratamientos del lodo producen distintas clases y volúmenes. En una misma planta de tratamiento, las características varían durante el año, o aun diariamente, debido a las variaciones en la composición del agua y del proceso. Estos cambios son particularmente pronunciados en las plantas que reciben descargas industriales.

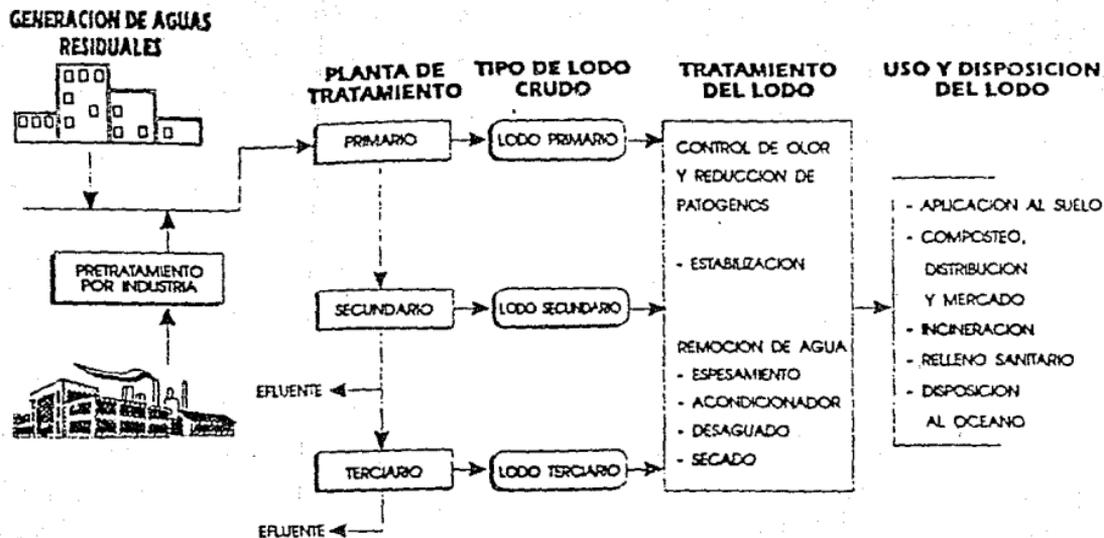


Lámina 1. Origen del lodo residual

Su contenido de patógenos y tóxicos lo hacen un desecho difícil de disponer. Sin embargo, el análisis físicoquímico del lodo proporciona pruebas de su valor fertilizante, por lo que su uso constituye una alternativa de disposición.

#### 1.2.1 Contenido de patógenos

Urbassik (1978), menciona cuatro grupos básicos de patógenos: 1) virus, 2) bacterias, 3) protozoarios, y 4) helmintos. El cuadro 1 muestra algunos de los patógenos presentes en el agua y lodo. Sin embargo el número y tipo de organismos presentes en los desechos varía de comunidad a comunidad, dependiendo de la urbanización, densidad de población, hábitos sanitarios, estación del año, etcétera.

#### 1.2.2 Contenido de metales pesados

La disposición incontrolada del lodo, en basureros, rellenos sanitarios, o en cuerpos de agua, produce un impacto ambiental negativo, ya que, los metales pesados penetran la cadena alimenticia. Su presencia en grandes cantidades, en el suelo, causa fitotoxicidad por metales tales como Zn, Cu o Ni, o absorción y acumulación de Cd, en tejidos animales y vegetales.

En el cuadro 2 se aprecian los rangos medios y máximos de metales pesados, en lodos digeridos anaeróbicamente. Los valores más bajos corresponden a efluentes suburbanos.

Como se observa, el lodo contiene niveles más altos de metales pesados que el suelo, aún cuando sea de origen doméstico.

Cuadro 1. Principales patógenos presentes en el agua y lodo residual

PATOGENO	ENFERMEDAD/SINTOMAS
<b>Bacterias:</b>	
<i>Salmonella spp.</i>	Salmonelosis, fiebre tifoidea
<i>Shigella spp.</i>	Disentería bacilar
<i>Yersinia spp.</i>	Gastroenteritis aguda
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis
<b>Virus:</b>	
Poliovirus	Poliomelitis
Coxsackievirus	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre y escalofríos
Echovirus	Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebre, escalofríos, diarrea
Virus de Hepatitis A	Hepatitis
Rotavirus	Gastroenteritis aguda con diarrea severa
Agentes Norwalk	Gastroenteritis contagiosa con diarrea severa
Reovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
<b>Protozoarios:</b>	
<i>Cryptosporidium, sp</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disenteria amibiana (Enteritis aguda)
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (incluyendo diarrea, calambres abdominales, pérdida de peso)
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis
<b>Helminetos:</b>	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Disturbios digestivos y nutricionales, dolores abdominales, vómito
<i>Ascaris suum</i>	Puede producir síntomas tales como tos, dolor de pecho y fiebre
<i>Trichuris trichiura</i>	Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso
<i>Toxocara canis</i>	Fiebre, dolor abdominal, dolor muscular, síntomas neurológicos
<i>Taenia saginata</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, disturbios digestivos
<i>Taenia solium</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, disturbios digestivos
<i>Necator americanus</i>	Anquilostomiasis
<i>Hymenolepis nana</i>	Teniasis

EPA (1985) and EPA (1989c) citado en PAHO, WHO and EHP, 1989.

Cuadro 2. Concentración de metales pesados en lodos residuales

Elemento	Rango reportado		Valor promedio del lodo	Suelo normal	Máximo en lodos domésticos
	Mínimo	Máximo			
As, ppm	1.1	230	10	-	-
Cd, ppm	1.0	3 410	10	0.1	25
Cd/Zn, %	0.1	110	0.8	-	200
Co, ppm	11	2 490	30	-	200
Cu, ppm	84	17 000	800	15	1 000
Cr, ppm	10	99 000	500	25	1 000
Fe, ppm	80	33 500	260	200	1 000
Pb, %	0.1	15.4	1.7	2.0	4.0
Hg, ppm	0.6	56	6	-	10
Mn, ppm	32	9 870	260	500	-
Mo, ppm	0.1	214	4	-	25
Ni, ppm	2	5 300	80	25	200
Pb, ppm	13	26 000	500	25	1 000
Sn, ppm	2.6	329	14	-	-
Se, ppm	1.7	17.2	5	-	-
Zn, ppm	101	49 000	1 700	50	2 500

PAHO,WHO and EHP, 1989.

### 1.2.3 Contenido de tóxicos orgánicos

En el cuadro 3 se muestra la caracterización hecha en los lodos de 209 plantas de tratamiento en Estados Unidos. En ésta se demuestra que hay una relación entre la contribución de aguas industriales y la presencia de tóxicos orgánicos (EPA, 1985).

Cuadro 3. Concentración de tóxicos orgánicos en lodo

Compuesto orgánico	Concentración mg/kg		
	Media	Mínima	Máxima
4,4'-DDD	0.391	0.391	0.391
4,4'-DDE	0.100	0.030	0.190
4,4'-DDT	0.051	0.015	0.121
Aldrín	0.029	0.019	0.046
Benceno	0.098	0.012	0.220
Benzo(a)pyreno	10.785	0.671	24.703
Bis(2-etilexil)			
phtalato	107.233	0.510	89.129
Clordano	0.489	0.489	0.489
Dieldrín	0.024	0.013	0.047
Dimetil nitrosamina	(1)	(1)	(1)
Heptacloro	0.023	0.023	0.023
Hexaclorobenzeno	(1)	(1)	(1)
Hexaclorobutadieno	(1)	(1)	(1)
Lindano (Gama-BHC)	0.074	0.072	0.076
BPC-1016	(1)	(1)	(1)
BPC-1221	(1)	(1)	(1)
BPC-1232	(1)	(1)	(1)
BPC-1242	(1)	(1)	(1)
BPC-1248	(1)	(1)	(1)
BPC-1254	(1)	(1)	(1)
BPC-1260	(1)	(1)	(1)
Toxafeno	(1)	(1)	(1)
Tricloroetileno	0.848	0.024	3.302

(1) En concentraciones por debajo del límite de detección.

#### 1.2.4 Otros contaminantes

Una aplicación no controlada de lodo en el suelo provoca un exceso de nitratos que son lixivados al acuífero. Al hombre le afecta cuando ingiere agua con exceso de estos compuestos. Los nitratos se acumulan en los tejidos vegetales, principalmente en las hojas lo que provoca problemas en los animales que se alimentan con ellas.

Otros problemas potenciales en el uso de éste desecho son el exceso de sales y una alta cantidad de sodio. El primero reduce la germinación de las plantas y su crecimiento. El segundo causa la dispersión de las partículas del suelo, lo que provoca un empobrecimiento en su estructura y reduce los porcentajes de infiltración de agua.

Desde el punto de vista de salud humana un exceso de nitratos o sodio puede provocar disfunciones cardiovasculares, hematológicas y neurológicas (PAHO, WHO and EHP, 1989).

### 1.3 Contenido de nutrimentos

Garrigan, 1977, señala las siguientes ventajas nutrimentales en la aplicación de lodo residual al suelo:

1. Valor Nutrimental: los lodos de aguas negras contienen 2-6% de nitrógeno, 2-8% de fósforo ( $P_2O_5$ ) y 0.2-0.8% de potasio ( $K_2O$ ) (en porcentaje de sólidos secos).
2. La materia orgánica de los lodos mejora la calidad del suelo al incrementar el contenido de humus, aumentar la retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico. Todo esto contribuye a la fertilidad.

Epstein, et al., 1976, señalan que el lodo tiene principalmente materia orgánica (40 o 60%) que lo convierte en una fuente de este recurso. Sin embargo, su contenido de contaminantes limita su uso, por lo que es necesario darle un tratamiento antes de que sea dispuesto o aprovechado en la agricultura.

### 1.4 Tratamiento del lodo residual

La selección o la combinación de tratamientos está en relación de las condiciones de operación, los costos y la disposición final del lodo. Los tratamientos más usuales, así como sus combinaciones, que son aceptables para la disposición o aprovechamiento del lodo en la agricultura se encuentran en la lámina 2.

Los tratamientos del lodo tienen como propósito su desinfección, la que se lleva a cabo por la destrucción o inactivación de organismos patógenos. Se entiende por destrucción la disrupción física o desintegración de los patógenos, mientras que la inactivación es la propiedad de evitar o remover el poder infectivo de los patógenos.

Los procesos de estabilización reducen el volumen del lodo de 25 a 40% debido a que muchos de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono, metano y otros productos. La estabilización lograda depende de parámetros operacionales como temperatura, mezclado y tiempo de retención (Environmental Protection Agency, 1986a).

Los efectos de los tratamientos sobre las propiedades del lodo se muestran en el cuadro 4.

8

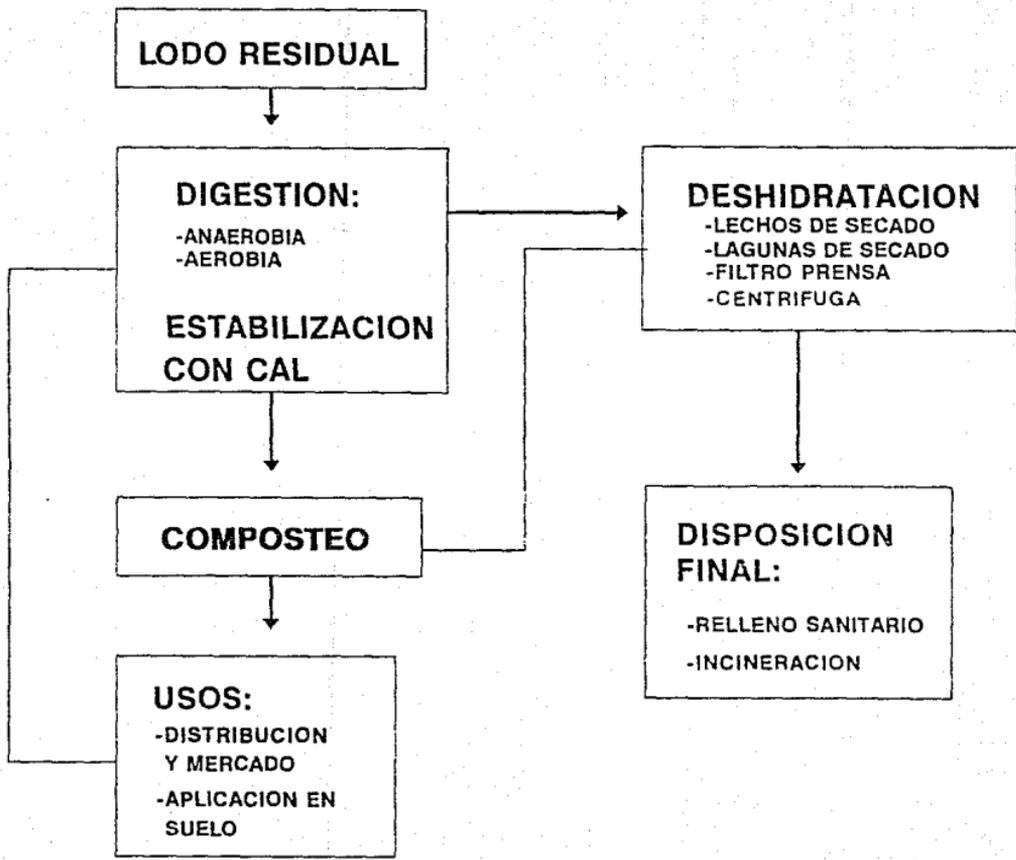


Lámina 2. Tratamiento del lodo para su disposición y aplicación en suelo

Cuadro 4. Reducción de patógenos y estabilización de lodo residual con diferentes tratamientos

Tratamiento	Reducción de patógenos	Putrefacción potencial	Disminución de olor
-Digestión Anaerobia	adecuada	baja	buena
-Digestión Aerobia	adecuada	baja	buena
-Cloración, fuerte	buena	media	buena
-Tratamiento con cal	buena	media	buena
-Pasteurización (70°C)	excelente	alta	adecuada
-Radiación por ionización	excelente	alta	pobre
-Tratamiento por calor (195°C)	excelente	alta	pobre
-Composteo (60°C)	buena	baja	buena
-Laguna de Digestión	buena		

Farrel, J. B. and G. Stern, 1974

#### 1.4.1 Espesamiento

El espesamiento logra la remoción de agua del lodo para reducir su volumen. Trae como beneficios facilidad en el manejo y almacenamiento, remoción de arena, gases y clarificación, (Environmental Protection Agency, 1979).

#### 1.4.2 Estabilización

El objetivo principal de la estabilización del lodo es la reducción de los malos olores, la putrefacción y la disminución de patógenos. Muchos de los métodos de estabilización, como la digestión anaerobia y aerobia, reducen la cantidad de sólidos suspendidos (EPA, 1979).

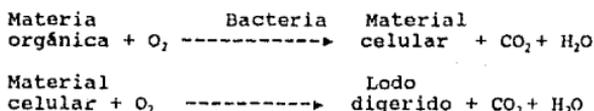
##### 1.4.2.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es la degradación biológica de las substancias orgánicas en ausencia de oxígeno. Durante el proceso, se libera energía y gran parte de la materia orgánica es convertida a metano, dióxido de carbono y agua. Mientras un poco de carbono y energía permanece disponible para sostener una actividad biológica adicional, los sólidos que permanecen son estabilizados. La digestión anaerobia es un método de estabilización para lodos con bajas concentraciones de tóxicos y un contenido de sólidos volátiles mayor de 50% (EPA, 1979).

Los microorganismos anaerobios son sensibles y no crecen bajo condiciones de operación variables. Por lo tanto, los procesos tienen que ser cuidadosamente planeados, principalmente donde existen variaciones en la cantidad y calidad del lodo. La digestión anaerobia reduce los sólidos volátiles de 70-80% (peso seco) a 50% (PAHO, WHO and EHP, 1989).

#### 1.4.2.2 Digestión aerobia

La digestión aerobia es la estabilización bioquímica oxidativa del lodo, en tanques abiertos o cerrados, donde son separados del proceso de tratamiento del agua (EPA, 1979). La digestión aerobia incluye la oxidación directa de cualquier materia biodegradable y la oxidación de material celular microbiano por otros organismos. Estas dos etapas son ilustradas por las siguientes reacciones:



El segundo proceso se conoce como respiración endógena y es la reacción predominante de la digestión aerobia (EPA, 1979).

#### 1.4.2.3 Estabilización con cal

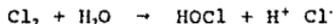
El encalado es útil en aquellas plantas que producen lodo en exceso y sus tanques de digestión no tienen la capacidad para tratarlo adecuadamente. El encalado a un pH 12 reduce el número de bacterias patógenas a un valor insignificante en una hora. Los huevos de *Ascaris* pueden sobrevivir, pero el peligro de patógenos no es más grande que el de cualquier lodo digerido (PAHO, WHO and EHP, 1989).

La cal hidratada o cal viva son utilizadas en dosis relativas que pueden ser tan altas como 0.3 kg de cal/Kg de lodo (en base seca). Otro de los efectos obtenidos con el encalado es el incremento en el contenido de sólidos. La cal es comúnmente usada para acondicionar el lodo antes de ser desecado (PAHO, WHO and EHP, 1989).

#### 1.4.3 Cloración

El tratamiento por cloración estabiliza el lodo de dos formas disminuye el número de organismos que generan mal olor y hace el sustrato menos apropiado para el crecimiento bacteriano. Los mecanismos responsables son la oxidación, la adición de cloro a compuestos no saturados y el desplazamiento del hidrógeno por el cloro.

La reacción inmediata cuando es agregado el cloro al agua se muestra a continuación:



En la cloración se reduce el pH en un rango de 2 a 3. La disociación de HOCl a H<sup>+</sup> y OCl<sup>-</sup> es suprimida por bajo pH y no es significativa. El Cl<sub>2</sub> y el HOCl son altamente reactivos poderosos bactericidas y viricidas. Una dosis de cloro de 1,000 mg/l aplicados a lodos activados con un 0.5% de sólidos reduce la cuenta total de bacterias de cuatro o siete logaritmos (EPA, 1979).

Las desventajas de este proceso son: la necesaria estabilización del pH del lodo antes de su aplicación al suelo, lo que redundan en el costo del tratamiento y que no hay reducción en su volumen.

#### 1.4.4 Pasteurización

Con una temperatura de 70°C, durante 10 minutos, se inactivan los huevos de parásitos y se reduce la población de virus y bacterias a niveles no detectables. A temperaturas más altas de 90°C, durante 10 minutos, se destruyen todos los patógenos.

El proceso consiste en inyección de vapor, el lodo entra primero a un precalentamiento con temperaturas de 18 a 38°C producidas por vapores que provienen de una caldera. Después pasa a un tanque donde es inyectado vapor que alcanza temperaturas de 70°C, y el tiempo de retención es de 30 minutos. Finalmente pasa a un tanque donde es enfriado a 35°C (EPA, 1979) lámina 3.

#### 1.4.5 Acondicionamiento

El acondicionamiento implica el tratamiento biológico, químico y físico del lodo con el propósito de aumentar la remoción de agua.

Debido a la heterogeneidad de las partículas del lodo, se dificulta el desaguado, por lo que es necesario un procedimiento que forme agregados. En la lámina 4, se muestra el tamaño de las partículas contenidas en lodos.

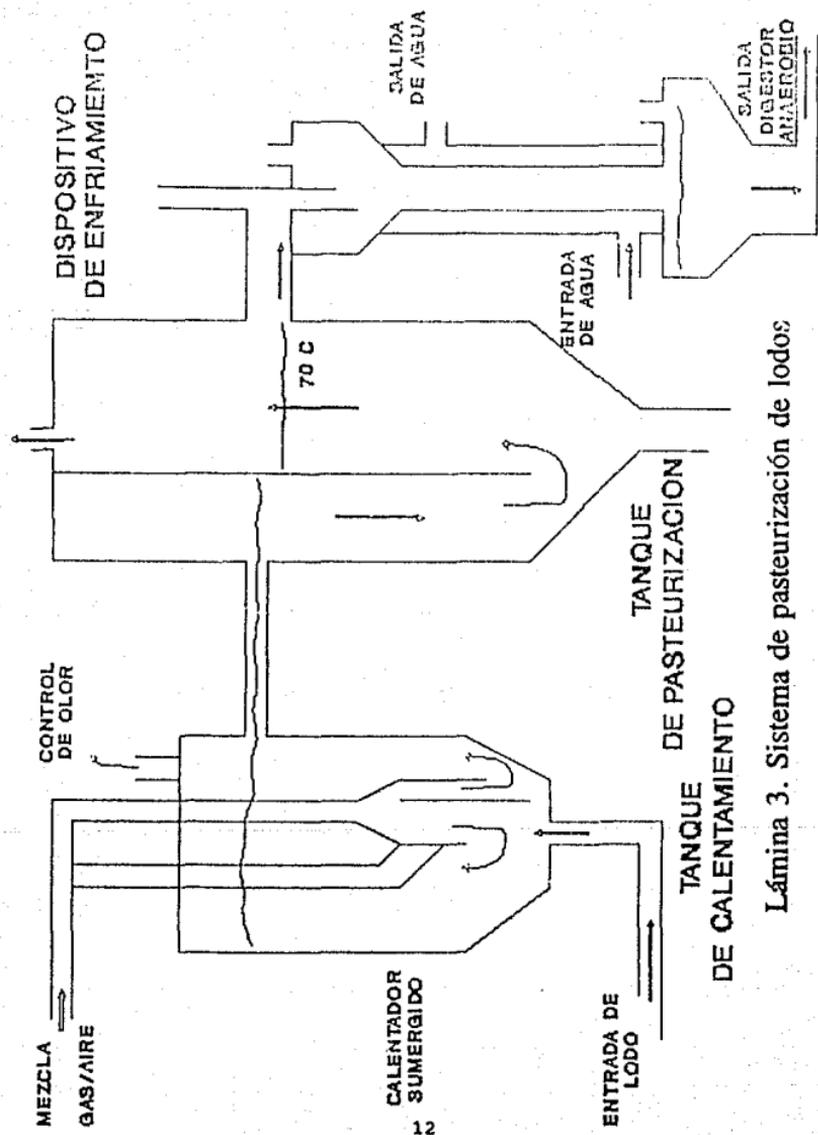


Lámina 3. Sistema de pasteurización de lodos



El agua impide mediante fuerzas electrostáticas la unión de las partículas. El acondicionamiento se usa para contrarrestar los efectos de hidratación y repulsión electrostática y permitir la formación de agregados. El proceso tiene dos etapas:

La primera consiste en la desestabilización, las superficies de las partículas son alteradas para que puedan adherirse entre sí. Esto se logra con los polímeros excretados por los microorganismos o adicionando polímero orgánico sintético, o bien, sales metálicas inorgánicas, como sulfato de aluminio o cloruro férrico. Se debe tomar en cuenta que el uso de polímeros o sales incrementa los costos de operación. La segunda es la floculación, y consiste en facilitar el contacto de las partículas desestabilizadas por medio de una agitación lenta.

#### 1.4.6 Desaguado y secado

El lodo es desaguado para aumentar la concentración de sólidos y reducir los costos del transporte al sitio de disposición. Los métodos utilizados son llevados a cabo por centrifugas, filtros al vacío, prensas de banda y filtros prensa. Su efectividad depende de las características del lodo y la cantidad y tipo de acondicionadores químicos utilizados para la coagulación, el diseño de la maquinaria y las condiciones de operación. La concentración de sólidos obtenida con los métodos anteriores se encuentra en un intervalo de 10-40%. Las camas de secado pueden producir concentraciones de sólidos de 40 a 80%, pero ocupan una amplia superficie, por lo cual no son utilizadas en las plantas de tratamiento.

#### 1.5 Composteo

El composteo es un proceso microbiológico que degrada el lodo y lo estabiliza, es el único método que provee una destrucción significativa de patógenos y produce un sustrato estéticamente aceptable que puede ser usado benéficamente sobre el suelo como un fertilizante o como un acondicionador de suelo.

El composteo puede tener ventajas sobre otras alternativas, por ejemplo:

Costos inferiores en el capital inicial y manejo del proceso, comparado con la incineración y el relleno sanitario (Ramírez, et al. 1991). Además la posibilidad de recuperación de lo invertido y el autofinanciamiento del sistema. En cuanto a la aplicación en suelo un producto de más fácil uso.

Los principios son flexibles y se pueden adaptar a una gran variedad de condiciones presentes en las plantas de tratamiento. Estos principios también son aplicables a todos los residuos sólidos que se deseen tratar, individualmente o en forma combinada, por ejemplo basura-lodo.

Los sistemas de composteo están generalmente divididos dentro de tres categorías: camellón, pila estática y reactor o digestor (EPA, 1985).

#### 1.5.1 Camellón

Es un montículo de material dispuesto en hilera, esta disposición permite su ventilación natural por la difusión y el movimiento convectivo del aire, lámina 5.

Las dimensiones del camellón son aproximadamente 15 m de largo, 4.50 m de ancho y 1.50 m de altura.

Las ventajas del camellón son: proporcionar un rápido secado del material, lo que facilita la separación del material acondicionador durante el cribado. La inversión en cuanto a equipo, es baja, consiste principalmente de una mezcladora, un cargador frontal y carros de volteo para el transporte de material.

Las desventajas son: se requiere de área mayor que en la pila estática y reactor y se necesita de más monitoreo que en la pila estática, para asegurar la aeración y la elevación de temperatura.

#### 1.5.2 Pila estática

En este sistema la aeración es forzada. El aire es proporcionado por un soplador y es conducido, por un difusor, hacia la mezcla.

Las ventajas que ofrece este sistema son: la aeración es controlada y proporcionada por un sistema de ventilación, sin remover el material. Los requerimientos de equipo consisten de un cargador frontal, para realizar el mezclado, una superficie pavimentada, un soplador, un difusor y una cribadora, lámina 6.

#### 1.5.3 Reactor

En este sistema el proceso se lleva a cabo en condiciones total o parcialmente cerradas, y las condiciones ambientales pueden ser controladas.

Las fuentes de aire utilizadas son las siguientes: compresores de desplazamiento centrífugo o positivo; ventiladores de flujo axial y compresores de presión baja (Willson, et al. 1980).

Las ventajas de los reactores son: el poco requerimiento de área, mayor control en el proceso, por que no hay influencia de cambios meteorológicos y un control más efectivo en el olor.

La desventaja principal reside en los altos costos de la inversión inicial y el mantenimiento, lámina 7 .

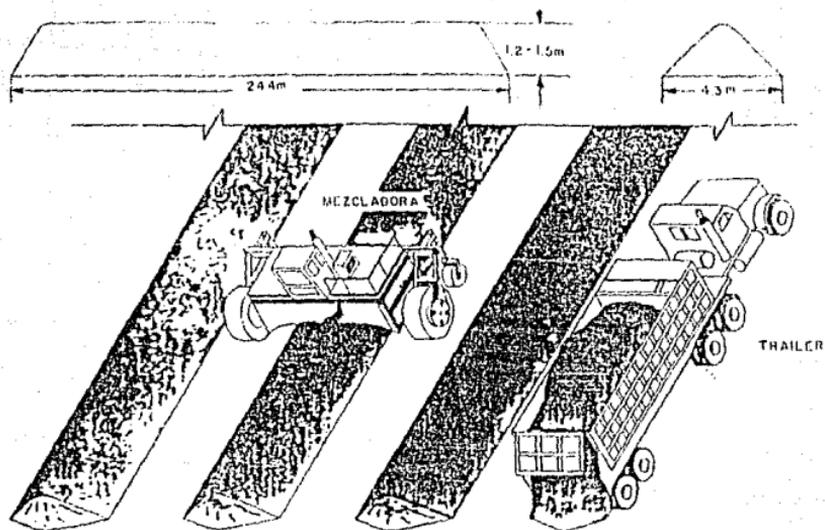


Lámina 5. Composteo en camellón

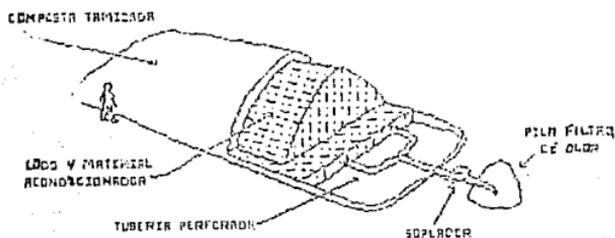
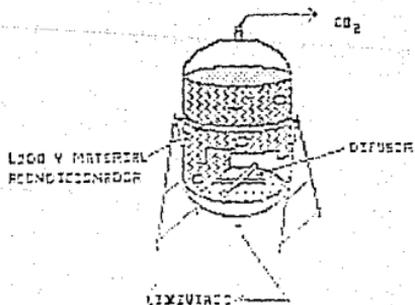


Lámina 6. Composteo en pila estática

Lámina 7. Composteo en reactor



### 1.6 Aprovechamiento de lodo residual

El lodo o la composta de lodo residual pueden usarse como sustrato para el cultivo y propagación de plantaciones agrícolas, forestales y horticolas, así como en la recuperación de suelos erosionados.

Las ventajas de esta práctica son las siguientes:

-Permite a los agricultores contar con un producto de alto contenido de materia orgánica, que ayuda al mejoramiento de las características físicas del suelo.

-Evita la explotación de suelos naturales, en el caso de sustratos de vivero, los cuales son cada vez más difíciles de conseguir por la protección que las leyes de ecología están otorgando como medida para la conservación de bosques.

-El lodo, aplicado en porcentajes agronómicos, puede proporcionar los requerimientos de nutrimentos esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio necesarios para los cultivos.

-Protección del acuífero, debido a que el nitrógeno contenido en el lodo está enlazado a la materia orgánica, puede ser menos contaminante que el nitrógeno contenido en fertilizantes químicos.

El uso de lodos, debe cumplir con las normas sanitarias que garanticen que los elementos contenidos no produzcan condiciones fitosanitarias adversas a las plantas cultivadas. Además se deberá evitar la contaminación de acuíferos por lixiviados. Lo anterior se logra al dosificar las mezclas adecuadamente y al llevar un control mediante el monitoreo del suelo. En el Capítulo 4 se proporcionan los criterios y normas para la aplicación del lodo residual en suelo.

### 1.7 Incineración

La incineración es una combustión completa que consiste de dos etapas que incluyen el secado (200°C) y la ignición (1 000°C), lámina 8.

Las ventajas de la incineración son: reducir el volumen total del lodo en aproximadamente un 95% y también las necesidades de disposición. Las desventajas son: su alto costo de capital, operación y mantenimiento; requiere de personal calificado y provoca contaminación atmosférica cuando no hay dispositivos para controlar las descargas a la atmósfera (EPA, 1986b).

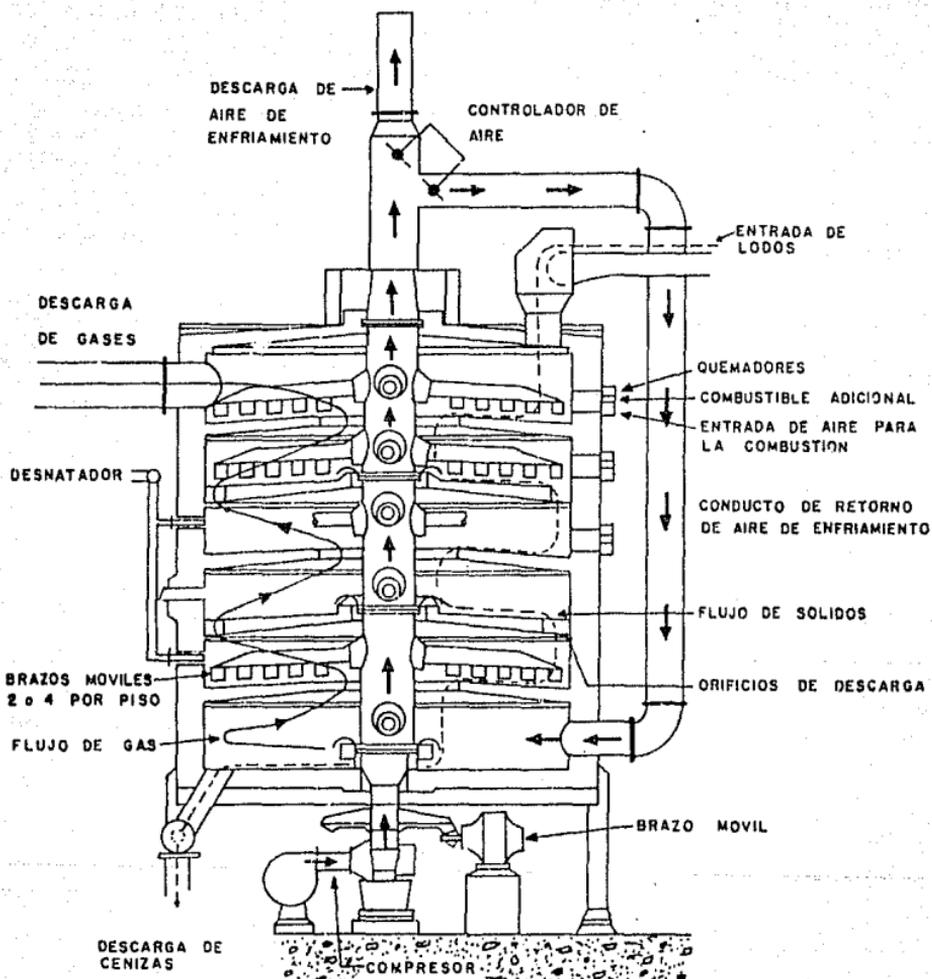


Lámina 8. Sección transversal de un horno de pisos múltiples

## 1.8 Relleno sanitario

El relleno sanitario es un método de disposición del lodo en el cual éste es depositado en un área dedicada para tal propósito, sólo o con otros residuos para posteriormente ser tapado con suelo.

Cuando el lodo es enterrado, se lleva a cabo una degradación anaerobia debido a que el oxígeno es insuficiente; la descomposición así, es lenta y menos completa que un proceso aerobio.

Aunque se puedan corregir algunos problemas con este sistema, la falta de control, en la disposición, provoca contaminación en el acuífero, la que es difícil de detectar hasta que el daño ha ocurrido y resulta difícil corregir el problema.

Si las operaciones en el relleno sanitario son apropiadamente planeadas y ejecutadas, un relleno sanitario puede ser usado por el municipio para otros propósitos, tales como áreas recreacionales.

Existen dos clases de relleno sanitario (EPA, 1978):

En trincheras o zanjas. En este tipo de relleno sólo se hace disposición de lodo. Las zanjas varían de 1 a 15 m de ancho. Las zanjas angostas miden de 1 a 3 m. El lodo debe tener por lo menos 10% de sólidos; este método puede incluir material acondicionador, como arena fina. El lodo deberá ser cubierto con suelo el mismo día en que es depositado, con el propósito de minimizar olores y prevenir el contacto del lodo con otros vectores como pájaros, insectos y perros.

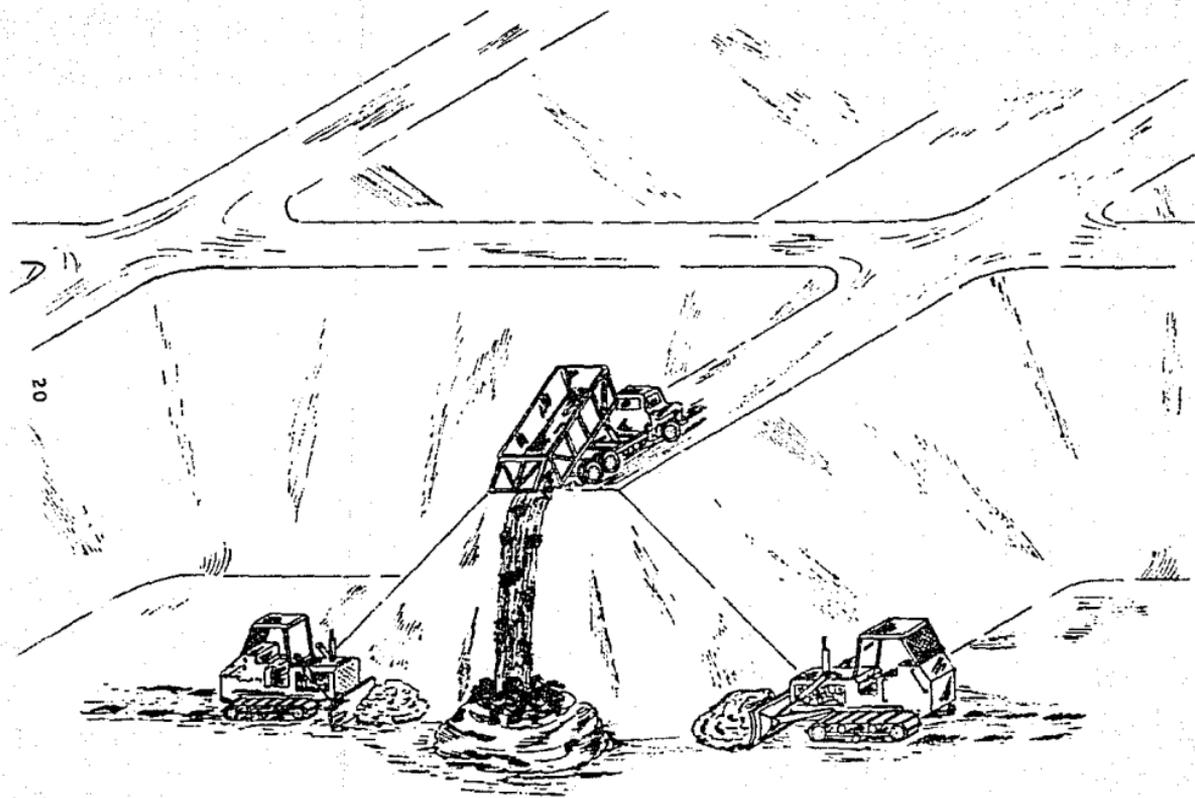
Codisposición. En la cual el lodo es dispuesto en un relleno municipal junto con basura. Consiste principalmente en esparcir encima de la basura el lodo, el cual generalmente es líquido, y después mezclarlo (aproximadamente 7 ton de basura por 1 ton de lodo). Otro método consiste en mezclar lodo y suelo, y después esparcirlo encima de la basura.

Las dimensiones de las zanjas varían de 1 a 15 m de ancho. En zanjas angostas el ancho es de 1 a 3 m y la longitud de aproximadamente 200 m. En la lámina 9 se observa un diagrama general del relleno sanitario.

En el cuadro 5 se presentan los tipos de relleno sanitario y las características del lodo para ser tratado por esta tecnología.

En la operación de un relleno sanitario se debe considerar la infraestructura necesaria para la captación de lixiviados, de escurrimientos y el control de gases generados durante la descomposición. Además el monitoreo del acuífero, agua superficial y gases.

# Lámina 9. Relleno sanitario



Son pocas las ventajas de este método por lo que actualmente es desplazado por las nuevas tecnologías de aprovechamiento; sin embargo bien operado puede ayudar a minimizar problemas de salud y ambientales. Paralelamente al relleno se puede hacer la reforestación del área.

Cuadro 5. Tipos de relleno sanitario, características y volumen de lodo tratado.

Tipo de relleno sanitario	Contenido de sólidos en el lodo	Material acondicionador	Volumen de lodo tratado lodo/ha
Trincheras angostas amplias	15-28% ≥ 30%	No No	460 a 2120 200 a 6480
Codisposición mezcla lodo-basura	≥ 3 %	ocasional	180 a 1600
Lodo-cubierta de suelo	≥ 20%	ocasional	

Nota. Todo el lodo que sea dispuesto en suelo debe ser previamente estabilizado y desaguado con el objeto de reducir el potencial de lixiviado y reducir el volumen de lodo.

De los métodos antes mencionados se seleccionó, para desarrollar este trabajo, el composteo en pila estática que es descrito en el siguiente capítulo.

## 2. COMPOSTEO EN PILA ESTÁTICA

En 1972, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y el Laboratorio de Recursos Orgánicos en Beltsville, Maryland iniciaron una investigación para determinar:

- a) Si el composteo representaba una alternativa viable que compitiera con los métodos de disposición del lodo utilizados, vertido al mar o relleno sanitario.
- b) Si la composta podría ser usada sin riesgo para la salud y el ambiente con beneficio para el suelo y las plantas.

Inicialmente en Beltsville se usó el método de composteo por camellón, sin embargo, sólo era recomendable para lodos completamente digeridos.

El lodo crudo provocaba problemas de olor cuando era removido el material y las temperaturas no alcanzaban un nivel aceptable, por lo que fue desarrollado el sistema de pila estática aerada (Lawrence and Willson, 1989). El método consiste en diferentes etapas de descomposición y estabilización.

### 2.1 Descripción de las etapas del proceso

En la lámina 10 se muestran las etapas que se llevan a cabo en el sistema de composteo de pila estática, las cuales se describen a continuación.

#### 2.1.1 Mezclado

El mezclado consiste en remover un acondicionador con el lodo, para proporcionar una mezcla con una porosidad o FAS (Free Air Space, espacios libres) de 30 a 35% (Haug Roger, 1979).

Para lograr esto, se dispone una capa del acondicionador en una superficie plana, suficientemente amplia para facilitar las maniobras del cargador frontal. Encima de ésta se coloca la torta de lodo, con la cuchara del cargador frontal se empuja el acondicionador hasta que cubra la torta de lodo y se forme una pila cónica.

Siempre con movimientos envolventes, debe evitarse el contacto de las llantas con el material, después se procede a hacer la mezcla hasta lograr una consistencia homogénea. Esta etapa es muy importante para garantizar un buen composteo.

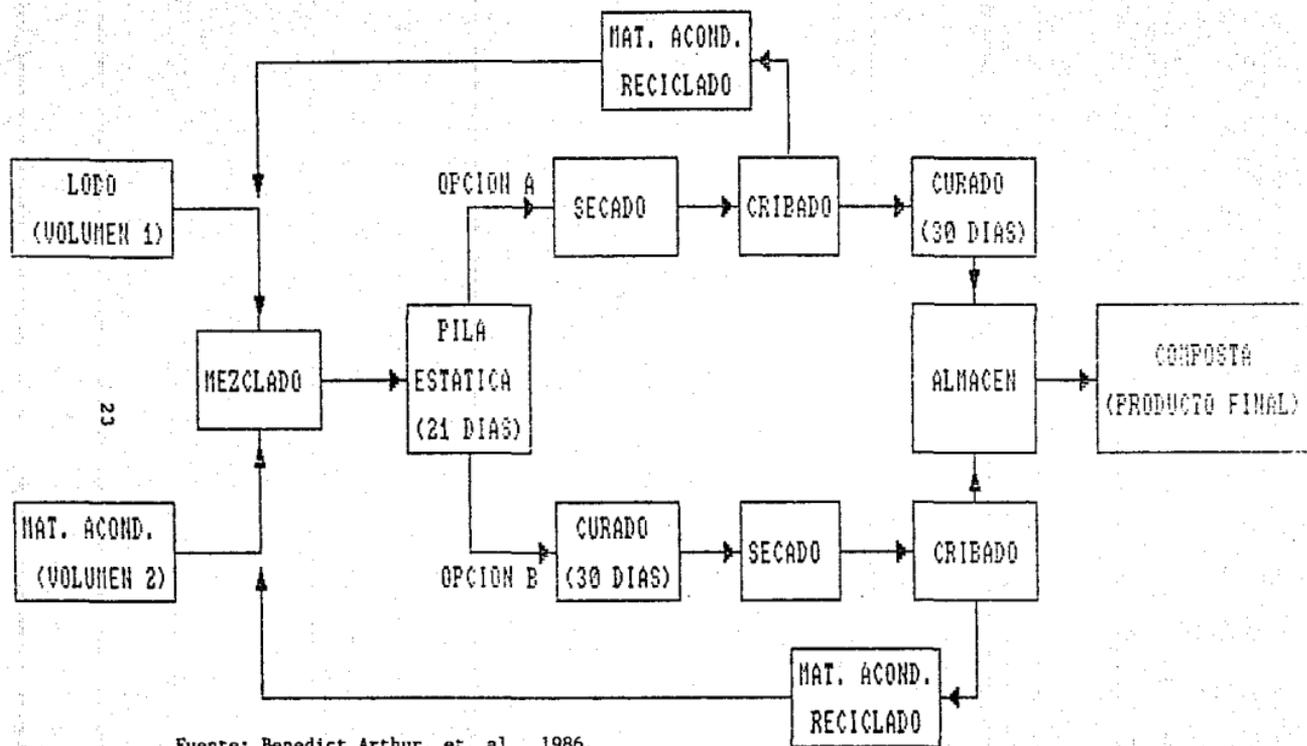


Lámina 10. Etapas básicas en el composteo de pila estática

### 2.1.2 Etapa termofílica

Tiene lugar después del mezclado y requiere de tres o cuatro semanas para completarse. Durante este tiempo, la mezcla debe tener aeración, con la finalidad de que los microorganismos tengan el oxígeno necesario para propagarse, realizar los procesos biológicos de descomposición, y generar altas temperaturas. Haug 1979, señala que es el momento de mayor actividad microbiana, caracterizada por la presencia de organismos termofílicos y alta disminución de sólidos volátiles biodegradables. Esta etapa requiere de mayor control en su operación.

### 2.1.3 Etapa de curado

Se desarrolla después de la etapa termofílica, su duración es de aproximadamente 30 días. Consiste en que se registran bajas temperaturas, reducción de los niveles de consumo de oxígeno y baja producción de olores. Esta etapa provee una degradación adicional de tóxicos orgánicos.

### 2.1.4 Secado y cribado

Son etapas opcionales en el proceso de composteo, tienen como propósito la obtención de un material de mejor calidad. El secado es posterior a la estabilización, puede durar sólo algunos días, es importante si se piensa cribar la composta para reciclar parte del material.

### 2.1.5 Reciclo de material

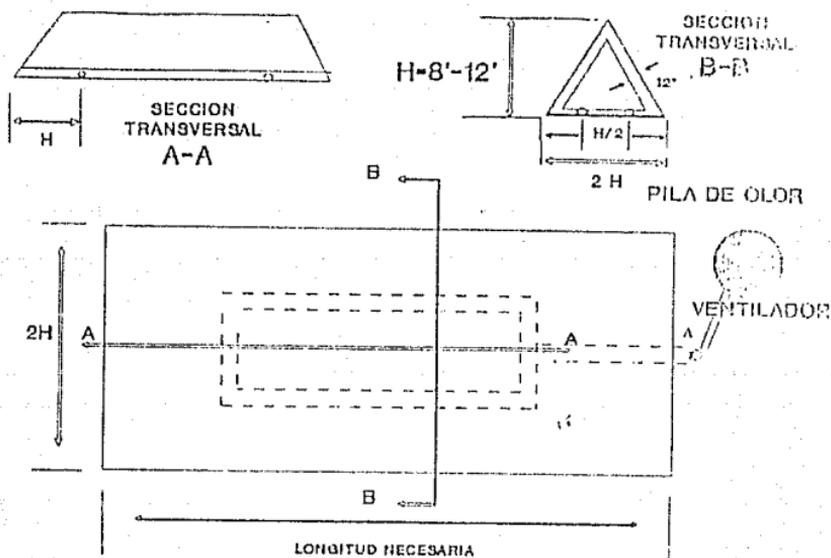
El material que es reciclado proviene de las partículas gruesas que permanecen en las mallas de la cribadora; sirve para el ahorro del acondicionador, de esta manera se abaten los costos.

### 2.1.6 Construcción de la pila estática

#### 2.1.6.1 Pila estática individual

La pila estática individual se construye mediante el siguiente procedimiento:

- a) Se coloca una tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro sobre una superficie pavimentada. Las perforaciones son hechas a los costados del tubo. En la lámina 11 se observa el sistema de difusión para una pila individual, así como indicaciones para su construcción.
- b) Se coloca una capa de 15 a 20 cm de pedazos de madera o grava, sobre la tubería y el área que será ocupada por la pila, hasta formar una cama. Esto permite el movimiento y distribución del aire durante el composteo. Ayuda también a drenar el exceso de humedad.



Se representa la longitud total de la pila con la letra A, su dimensión depende de la cantidad de lodo que va a ser tratado. La letra B es la sección transversal de la pila. La letra H es la altura de la pila; 2H es el ancho de la pila y siempre es igual al doble del valor de la altura, así si una pila tiene una altura de dos metros el ancho será de cuatro metros. La distancia entre los tubos del difusor es igual a la mitad de la altura  $H/2$ , en este caso serían dos metros. La distancia del tubo difusor a cada una de las cabeceras de la pila es igual a H, o sea cuatro metros. Se recomienda esta distancia entre el difusor y los márgenes de la pila para evitar un enfriamiento excesivo en estos puntos. La cubierta de la capa protectora que se coloca encima de la superficie deberá tener por lo menos un grosor de 12 pulgadas (30 cm aproximadamente).

Fuente: Willson, 1980.

### Lámina 11. Sistema de difusión para una pila individual

- c) Durante la construcción de la base de la pila, la tubería perforada es conectada, a través de una manguera flexible, a un ventilador.
- d) En seguida se coloca la mezcla lodo-acondicionador sobre la cama con ayuda de un cargador frontal, para formar una pila con una sección transversal triangular.
- e) La pila se cubre con una capa de 30 cm de composta curada o acondicionador, para evitar el enfriamiento de la superficie, prevenir el escape de malos olores y la presencia de moscas.
- f) En los primeros 15 días se extrae el aire de la pila, se conduce a un filtro de olor, formado con composta cribada o acondicionador. Para construirlo se necesita 1 yarda cúbica 0.765 m<sup>3</sup> por cada 10 toneladas de lodo, Willson, et al. 1980.

El contenido de humedad en el filtro no deberá exceder del 50% debido a que la capacidad de retención del olor tiende a disminuir.

#### 2.1.6.2 Pila estática extendida

Existen plantas de tratamiento que generan diario más de 5 toneladas de lodo, por lo que fue preciso modificar el sistema de pila individual a pila estática extendida, lámina 12.

Para el montaje de la pila extendida se efectúan los siguientes pasos:

- a) La producción de lodo diaria es mezclada con el acondicionador y colocada contra la pendiente de la pila del día anterior, hasta formar un cúmulo continuo o extendido que abarque 21 días de producción; la sección transversal de esta formación deberá ser trapezoidal, lámina 13.

La primera pila que se forma es individual con la producción de dos días, al segundo día se comienza a proporcionar aire. Así un ventilador proporciona aire a la mezcla de dos días. De esta manera el área se reduce hasta en un 50%, si se compara con la requerida si se tuvieran sólo pilas individuales.

- b) Después de 21 días de composteo la primer pila se lleva a curado y en su lugar se coloca una nueva. Para el curado hay que considerar un área igual a la de composteo ya que opera de manera similar a éste.

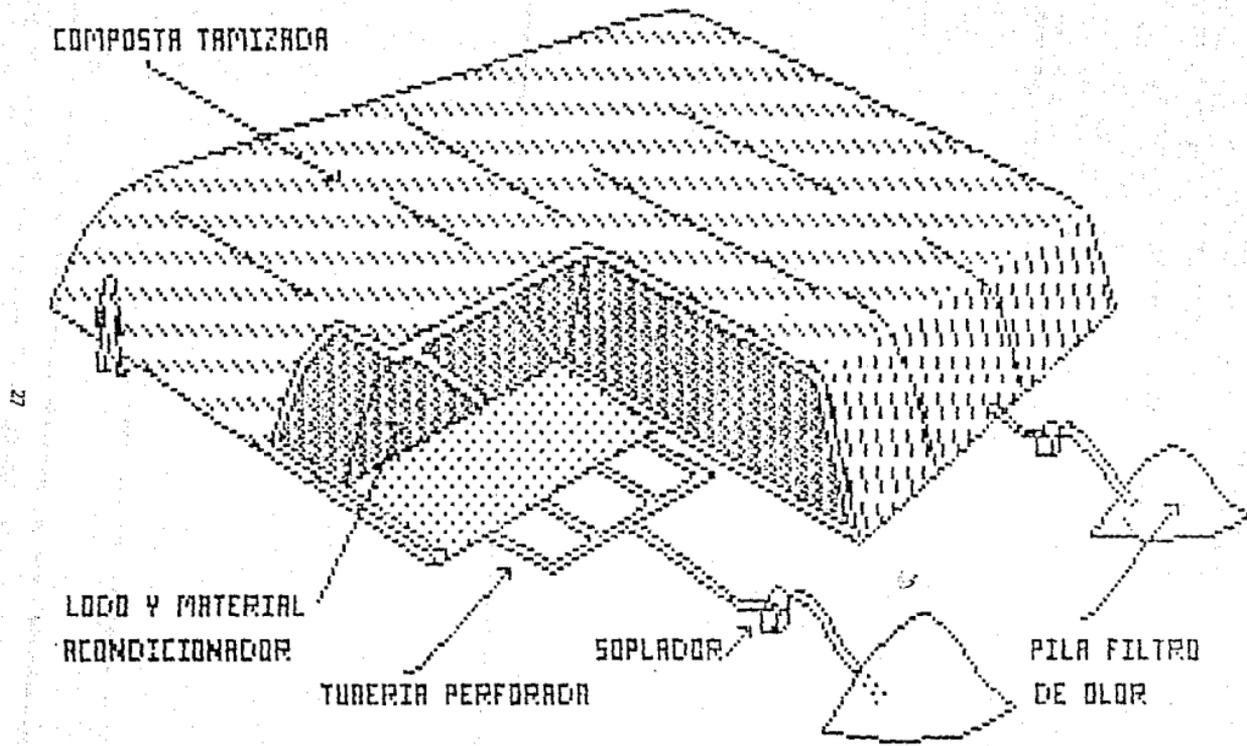


Lámina 12. Pila estática extendida para composteo y curado

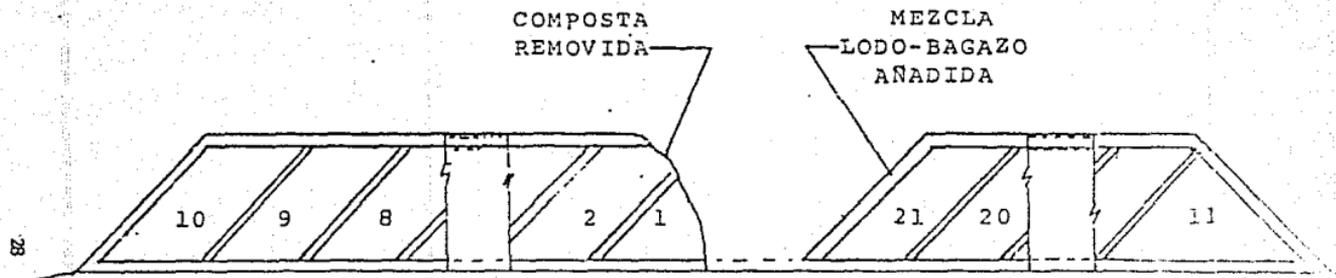


Lámina 13. Sección transversal de una pila extendida que muestra una secuencia típica de la adición de mezcla lodo-bagazo

## 2.2 Factores que influyen en el proceso de composteo

La remoción de patógenos y de tóxicos metálicos y orgánicos, son las metas del composteo; para alcanzarlas se tienen que tomar en consideración varios factores. Entre los cuales se incluyen: el porcentaje de humedad y sólidos, la relación carbono-nitrógeno C/N, el nivel de oxígeno, el pH, la temperatura y los acondicionadores.

### 2.2.1 Contenido de humedad y sólidos en la mezcla lodo-acondicionador

Para asegurar un adecuado composteo, la mezcla lodo/acondicionador deberá tener un nivel de humedad no mayor del 60%, Haug 1979.

Si se rebasa el límite de humedad, los poros en la mezcla son ocupados por agua que interfiere en el paso del aire y evita la difusión de los gases producidos. También provoca una descomposición incompleta, bajas temperaturas y mal olor.

Por otra parte aunque es poco frecuente una mezcla con baja humedad (<40%) puede inhibir también el proceso, Poincelot, 1975.

### 2.2.2 Relación carbono-nitrógeno (C:N)

La descomposición en la pila puede estar limitada por la cantidad de carbono y nitrógeno, o expresada por su relación C/N. La relación que se recomienda para el inicio del composteo es de 30 a 40:1 (Gray et al, 1971, Poincelot, 1975).

Una relación de C/N baja logra llevar a cabo el composteo pero durante el proceso hay pérdidas de nitrógeno por volatilización. Una alta relación (>50/1) provoca entorpecimiento del proceso porque no hay suficiente cantidad de nitrógeno lo que imposibilita sostener la masa microbiana.

La relación C/N del lodo crudo es de más o menos 15/1 y puede elevarse al adicionar un acondicionador con suficiente carbón como, cascarilla de arroz o bagazo de caña.

### 2.2.3 Ventilación y oxígeno

Uno de los factores que favorecen el composteo es el oxígeno disponible para los microorganismos que realizan el trabajo de descomposición. La deficiencia provoca condiciones anaerobias y estabilización incompleta de los materiales orgánicos.

El oxígeno usado durante el composteo por los microorganismos, es sólo del 5 al 15% para llevar a cabo la digestión orgánica y poder elevar así la temperatura. Es proporcionado por medio de un ventilador, que vence una columna o presión de agua, que depende del acondicionador utilizado y las pérdidas de presión en el sistema de difusión.

La capacidad del ventilador depende del volumen de la pila y de la geometría y dimensiones de los tubos de difusión. En pilas que contengan una mezcla de lodo con pedazos de madera se necesitan 500 pies<sup>3</sup>/hora/ton de lodo, Willson, et al. 1990.

El modo de ventilación también es significativo, se ha demostrado que la distribución de la temperatura en la pila es más uniforme con la aeración intermitente que con la continua.

Existen dos tipos de ventilación: la inyección y la succión. La ventaja de la ventilación por inyección de aire es que provoca el enfriamiento por evaporación, al mismo tiempo remueve agua. La ventilación por extracción ayuda a mantener temperaturas más homogéneas y extrae los gases que provocan el mal olor y los conduce a un filtro.

La succión debe aplicarse los primeros días cuando la generación de olor es mayor, y la inyección en los últimos días para provocar un secado más rápido del material.

#### 2.2.4 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH del lodo que va a ser composteado debe estar en un rango de 5-10. El composteo más eficiente se hace a pH 6 a 8, ya que la mayor parte de los microorganismos tienen actividad y crecimiento óptimos con estos valores. Sin embargo con pH extremos de 5 o de 11 sólo se retardará el proceso durante unos días, debido a que durante el composteo se tiende hacia el valor neutro (pH 7).

#### 2.2.5 Temperatura

El desarrollo de las poblaciones microbianas que degradan la materia orgánica depende de la velocidad de las reacciones químicas, influidas por la temperatura y el tiempo.

La temperatura elevada junto con un alto grado de humedad es uno de los métodos más efectivos para destruir patógenos. El calor húmedo mata las células porque coagula sus proteínas y es más rápido y efectivo que el calor seco, que las destruye al oxidar sus constituyentes químicos.

El calor proviene de las actividades metabólicas de los organismos al degradar el componente orgánico; la enzima ATP'asa es la principal responsable del calor producido. El papel que realiza esta enzima es el de disipar el exceso de ATP, de esta forma regula la energía del metabolismo de la célula, Felczar, Michael, 1991.

La diversidad de especies presentes en la pila de composteo tiene una distribución en el tiempo en el cual ocurre la degradación.

En la etapa inicial se registran temperaturas entre 25 y 40°C y predominan los microorganismos mesofílicos. En la etapa termofílica, hay una mayor remoción de patógenos, se encuentran poblaciones de actinomicetos y bacterias termofílicas, la temperatura, si no se controla, puede llegar hasta 80°C y las poblaciones empiezan a decaer.

Es necesario mantener el control de la temperatura por medio de ventilación en un rango de 45 a 55°C, óptimo para el desarrollo de estos organismos.

#### 2.2.6 Acondicionador

El contenido de humedad del lodo, después de ser desaguado, es de 75 a 83%, por lo que es necesario agregar un acondicionador que le proporcione estructura, porosidad y textura. Este debe tener resistencia y capacidad de adsorber humedad. Además se requiere que proporcione suficiente carbono para aumentar la relación carbono nitrógeno.

Hay que considerar la disponibilidad y el costo del acondicionador. Enfocar la atención especialmente en desechos agroindustriales que se producen en grandes volúmenes, como pedacería de madera, bagazo de caña y cascarrilla de arroz.

Otros materiales pueden considerarse como una fuente estacional, por ejemplo, algunos desperdicios de la cosecha como olote y rastrojo. En el cuadro 6 se enlistan algunos de los acondicionadores que fueron probados en Beltsville, Willson, et al. 1980.

Cuadro 6. Materiales acondicionadores reportados como satisfactorios en las pruebas de composteo desarrolladas en Beltsville

---

Pedacería de madera  
Desperdicios de la  
poda de árboles  
Olotes  
Composta sin cribar  
Carbón

Cáscara de cacahuete  
Basura clasificada  
Pedacería de llanta  
de automóvil más pedace-  
ría de madera

---

### 2.3 Balace de masa y de energía

El balance de masa ayuda a establecer qué cantidad de cada material (lodo y acondicionadores) debe ser usada durante cada etapa del proceso. Esta información es esencial para determinar parámetros como la relación lodo/acondicionador, tamaño de las pilas, equipo y necesidades de superficie.

En el Anexo 1 se muestra un ejemplo para el cálculo del balance de masa y energía.

### 2.4 Monitoreo

La pila estática está relativamente aislada de cambios externos, por lo cual los factores que influyen en ella no son alterados drásticamente. Sin embargo, para lograr una economía en la operación, obtener un producto de alta calidad y reducir el potencial de contaminación, es necesario el monitoreo.

En el cuadro 7 se enlistan los parámetros y a continuación se hacen algunos comentarios sobre su control.

Cuadro 7. Parámetros para el monitoreo del proceso de composteo

Parámetro	Intervalo de monitoreo
Contenido de humedad	Al inicio y cuando hay variaciones en los materiales
Temperatura	Diario en el composteo y curado
Oxígeno	Opcional
Patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos	Al inicio en la caracterización del lodo y acondicionadores y cuando hay variaciones en los materiales
Olor	Diario
Sistema de ventilación	Diario
Estabilidad de la composta y nutrientes	Caracterización de la composta y periódicamente como control de calidad

#### 2.4.1 Contenido de humedad

Cuando se trabaja en forma rutinaria, se debe tener una caracterización de la humedad de la mezcla inicial, para evitar hacer análisis continuos. Sólo cuando hay cambios tanto en el lodo como en los acondicionadores se hacen a diario para tener una nueva caracterización. Mensualmente se puede llevar un control de calidad en la mezcla y producto final.

#### 2.4.2 Registro de temperatura

Burge y Colaccio, 1979, proponen un registro de temperatura de 55°C por tres días consecutivos durante la etapa termofílica, para asegurar la destrucción total de patógenos. Finstein et al., 1987, sugieren que las temperaturas sean registradas en el curado. Ramírez, et al. 1991, establecen la necesidad de un registro permanente durante las dos etapas para asegurar una adecuada remoción.

Para llevar a cabo el monitoreo de temperatura se debe tener un mayor control en las partes más frías de la pila que están a los lados, en la base y cerca del difusor. Estos sitios deberán asegurar un nivel aceptable de destrucción de patógenos.

#### 2.4.3 Concentración de oxígeno

El monitoreo de este parámetro es también un buen índice para el control de calidad. Las lecturas de concentración deberán de oscilar de 5 a 15%, valores menores indican baja calidad de oxígeno y mala distribución del aire dentro de la pila. Esto ayudará para definir, junto con los datos de temperatura, los ciclos de aeración.

#### 2.4.4 Control de olor

El mal olor indica condiciones anaerobias, por lo que es necesario tener un registro diario. Los malos olores pueden controlarse mediante el sistema de extracción del aire, que es conducido a una pequeña pila cónica formada de composta cribada que sirve como filtro. Estas pilas deberán cambiarse periódicamente cuando se saturen.

#### 2.4.5 Analisis de nutrimentos y contaminantes

Los contaminantes se deben analizar al inicio del sistema en el lodo y acondicionadores, y eventualmente cuando haya cambios en los materiales. En la composta se debe hacer una caracterización del contenido de contaminantes y nutrimentos, y análisis periodicos como control de calidad.

En el cuadro 8 se muestran los parámetros fisicoquímicos y las técnicas de análisis recomendadas.

**Cuadro 8** Parámetros físicoquímicos y técnicas de análisis para el control del sistema de composteo

Parámetro	Método
Temperatura	Termopares o termistores
Humedad y sólidos totales	Evaporación (1)
Sólidos volátiles	Ignición (1)
Potencial de hidrógeno	Electrodo en una solución con agua destilada de 1:1 y 1:5 (2)
Densidad aparente	Método de la probeta (2)
Carbono orgánico	Walkley y Black (2)
Nitrógeno total	Kjeldahl (2)
Nutrientes: Ca <sup>++</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>++</sup> y P	Absorción atómica y flamometría (2)
Aniones solubles: SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup>	Extracto de saturación (2)
Tóxicos orgánicos: plaguicidas, bifenil policlorinados e hidrocarburos aromáticos	Cromatografía de gases (3)
Microorganismos patógenos: coliformes fecales y totales, enterococos y Salmonella	Número más probable (1)
Huevos de helmintos	Cuenta directa (1)

(1) American Public Health, 1976.

(2) Black, C.A., et al. 1965.

(3) EPA, 1988.

#### 2.4.6 Estabilidad de la composta

Existen diferentes métodos para medir la estabilidad del producto, entre los cuales se pueden citar:

-La medida de la respiración microbiana por medio de un respirómetro. Se mide la presión de oxígeno en una muestra de composta, y se evalúa la cantidad que es consumida por los microorganismos.

La desventaja es que las lecturas se alteran cuando hay exceso de temperatura o humedad en la muestra, estos factores afectan la actividad microbiana, (Willson and Dalmat, 1986).

-La medida del efecto de la composta sobre el crecimiento y desarrollo de plantas. Zucconi y Bertoldi 1987, desarrollaron una prueba basada en la medida del porcentaje de germinación y en la elongación de raíces en un extracto acuoso de composta. El procedimiento sólo requiere de 24 horas con incubación a 27°C y es cuantitativo.

-La relación carbono-nitrógeno es importante porque la composta va a ser utilizada en agricultura. Es también un indicador del comportamiento del proceso. Si se ha conducido bien la relación tenderá a reducirse, una relación baja es característica de una composta de alta calidad.

Una relación de 5-6/1 es considerada como indicadora de un material estable para una composta de lodo (Hirai, et al. 1988).

-El porcentaje de sólidos volátiles (%SV) es medido por ignición de la muestra a 550°C, es ampliamente usado como una medida inexacta del contenido de materia orgánica.

La actividad biológica disminuye el contenido de sólidos volátiles y convierte el carbón orgánico a CO<sub>2</sub>. Si se toma su medida durante el periodo de degradación puede servir para evaluar esta actividad, sin embargo es una medida inexacta.

La prueba no permite discriminar entre el material putrescible, que puede ser metabolizado durante el composteo y el que no puede ser descompuesto.

La sensibilidad de la prueba es pobre debido al alto porcentaje de sólidos volátiles en la mezcla y durante el proceso sólo se efectúa una pequeña disminución. Por ejemplo, si el porcentaje inicial de sólidos volátiles es de 80%, al final se podría obtener sólo 67%.

En el co-composteo con mezclas de basura municipal y lodos residuales, el decremento fue de 0.6% por día en un periodo de un mes (Golueke, et al., 1989).

Es difícil obtener muestras representativas, ya que son utilizados acondicionadores como pedacera de madera, bagazo de caña, que no se pueden separar y alteran los resultados.

-Demanda química de oxígeno. La descomposición aerobia disminuye la capacidad de la materia orgánica para reducir los oxidantes químicos, tales como el dicromato de potasio. Debido a eso la demanda química de oxígeno podría servir para cuantificar el grado de descomposición de la materia orgánica. Sin embargo es una medida inexacta de la materia orgánica.

No hay una constante entre la DQO y el grado de putrefacción. La DQO de la basura municipal disminuye de 900 a 350 mg/g durante seis meses del período de composteo (Lossin, 1971).

-Demanda bioquímica de oxígeno. Se define como la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos, mientras estabilizan la materia orgánica. Tiene la desventaja de requerir de 5 a 20 días, dependiendo de la naturaleza de la materia orgánica.

Tanto la DBO como la DQO fueron desarrolladas para analizar agua residual más que para sólidos.

## 2.5 Equipo

Ramírez et al., 1991, propusieron el equipo para el manejo de una planta de composteo de 20 toneladas de lodo por día, cuadro 9.

Cuadro 9. Maquinaria y equipo requerido para el manejo de una planta de composteo de 20 toneladas de lodo residual

---

### Maquinaria para el manejo de materiales:

1 cargador frontal de 3 m<sup>3</sup>  
1 camión de volteo de 10 m<sup>3</sup>  
1 cribadora de 25 m<sup>3</sup>/día

### Equipo

16 ventiladores con una capacidad de 467 pies<sup>3</sup>/min.  
1 equipo para control automático o manual de temperatura

---

El cargador frontal sirve para mover materiales en actividades como el mezclado, montaje y desmontaje de pilas. El camión de volteo es útil para su traslado y la venta de composta.

Para la aeración se usa un ventilador centrífugo horizontal con una capacidad de 467 pies cúbicos por minuto. Para el sistema de difusión se utiliza tubería de PVC perforada que se coloca en la base de la pila. Pueden ser utilizados otros dispositivos para la difusión, como mangueras flexibles o estructuras de concreto.

El ventilador es regulado por un controlador de tiempo que ordena la secuencia de prendido y apagado del equipo.

Para poder recuperar el acondicionador es necesario el uso de una cribadora. El proceso de cribado depende de la humedad de la composta, por lo que es necesario que el material tenga un 30 o 40% de humedad.

## 2.6 Criterios para la selección del sitio de composteo

La selección del sitio de composteo depende de:

- La localización del sitio donde el lodo es generado.
- De las fuentes de abastecimiento de acondicionadores.
- Del mercado potencial para la composta.
- De las condiciones específicas del sitio como son topografía, tipo y uso del suelo, geología, ubicación del acuífero y drenaje.

## 2.7 Áreas y distribución requeridas

El tamaño del sitio dependerá de la cantidad de materiales que serán manejados: lodo, acondicionador, composta. Colacicco et al., 1977, estimaron: 1 hectárea por 7 ton de lodo, por día.

Las áreas comprendidas en el sistema de composteo son:

- Área de recepción y almacenamiento de materiales (lodo y acondicionador por separado).
- Mezclado
- Composteo y curado
- Secado, cribado y otros procesos de acondicionamiento.
- Almacenamiento y envasado.

En la lámina 14, observamos la distribución de áreas propuesta por Ramírez et al., 1991, para una planta de composteo de 20 ton/lodo/día.

La distribución de las áreas se hizo tratando de minimizar los tiempos y movimientos de la maquinaria. Las operaciones que requieren el cargador frontal se encuentran una a continuación de otra y en forma secuencial. Las áreas de almacenamiento de bagazo y composta se encuentran en los extremos para facilitar el acceso del camión y la carga o descarga de los materiales.

Se consideran áreas adicionales como (oficinas, estacionamiento y mantenimiento de maquinaria. También es de utilidad un pequeño laboratorio para análisis rutinarios.

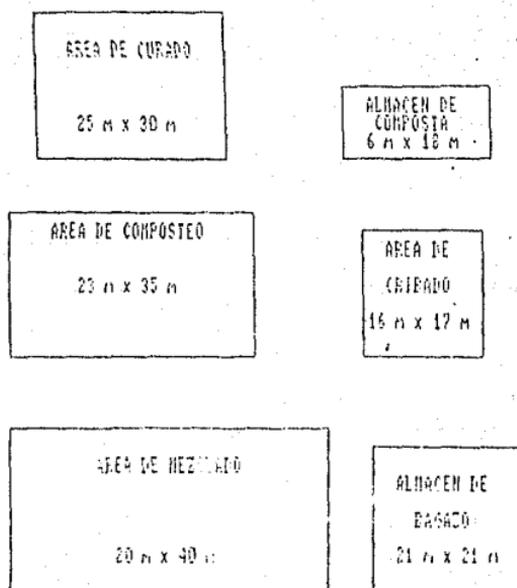


Lámina 14. Distribución de áreas de una planta de composteo

El recubrimiento del piso es de cemento para facilitar el manejo de materiales, limpieza y operaciones de mantenimiento, especialmente durante la estación de lluvias. El pavimento ayuda también a prevenir la contaminación del acuífero.

### 3 APROVECHAMIENTO DE COMPOSTA Y LODOS RESIDUALES

Existen factores en el suelo que ayudan a controlar el efecto contaminante de los patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos, contenidos en el lodo residual o composta cuando son aplicados al suelo. Estos aspectos deben ser analizados en los sitios de disposición para poder tomar medidas de control y adecuar las dosis necesarias.

#### 3.1 Factores reguladores del suelo

Entre los principales se encuentran el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. Otros que influyen son la temperatura, las sales solubles, la adición de quelatos solubles, la humedad, la fertilidad y la actividad de los organismos.

##### 3.1.1 Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno controla la disponibilidad de los metales. En la lámina 15 se observa la disponibilidad de los elementos con respecto al pH. Con excepción del molibdeno y el selenio, todos los microelementos son más asimilables por las plantas con menor pH.

Debido a esta disponibilidad de metales a pH bajos, se realizaron investigaciones para saber qué valor de pH del suelo se considera como aceptable para el control de éstos. Chaney, 1973, encontró que a un pH de 6.5 su asimilación por las plantas disminuía. Actualmente este valor es el requerido por la EPA, 1988, en la mezcla lodo-suelo para cultivos.

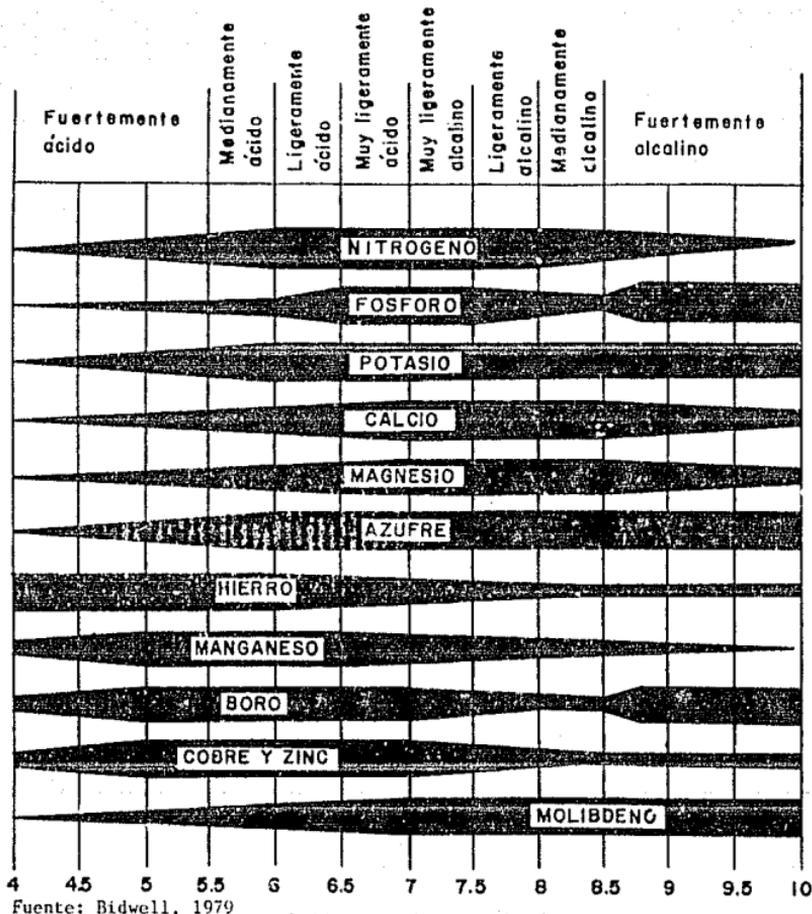
Las aplicaciones sucesivas de lodo a suelos neutros o ligeramente ácidos tienden a disminuir el pH, dependiendo del contenido de  $\text{CaCO}_3$  en el lodo. La oxidación de la materia orgánica y el contenido de sulfuros en los lodos aumentan la acidez del suelo.

Sin embargo la capacidad amortiguadora de la materia orgánica contenida en los lodos tiende a aminorar estos efectos.

En los suelos calcáreos las aplicaciones repetidas de lodo tienden a reducir el pH (CAST, 1980).

El nivel de pH es mantenido con un encalado periódico. Chaney et al., 1978, encalaron suelos ácidos que habían recibido lodo por cuatro años y encontraron que se redujo el transporte de Cd.

El pH de la rizosfera también es importante en la absorción de metales pesados. Cuando las raíces absorben  $\text{NH}_4^+$ , el pH de la rizosfera disminuye facilitando la entrada de metales, y cuando las raíces absorben  $\text{NO}_3^-$ , el pH se eleva.



Fuente: Bidwell, 1979

Acidez alcalinidad (pH)

Lámina 15. Disponibilidad de los elementos con relación de el pH de la solución del suelo

### 3.1.2 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónica (CIC), es un indicador de la capacidad de retención de metales por el suelo. Entre más grande sea el valor de la CIC más cationes retiene.

La CIC depende de la cantidad y clase de arcillas y materia orgánica presente.

Además la CIC, junto con la materia orgánica, controlan la toxicidad de los metales pesados en las plantas. Forman quelatos, principalmente con el cobre y níquel; los compuestos formados son estables y constituyen una fuente de energía potencial.

Las arcillas minerales tienen una CIC de 10-150 meq/100 g; la materia orgánica de 200 a 400 meq/100 g (Potash and Phosphate Institute, 1979).

### 3.1.3 Materia orgánica

La materia orgánica del suelo y lodo o composta, enlaza metales a través de:

- 1) El intercambio de cationes monovalentes como son el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , formando sales con grupos  $\text{COOH}$ .
- 2) A través de la formación de complejos organometálicos

La estabilidad de los compuestos formados es diferente. Stevenson 1972, estudió los complejos metal-orgánicos de los nutrientes traza, a pH 5, obtuvo la siguiente secuencia de estabilidad:



La lámina 16 muestra las reacciones de la materia orgánica contenida en el lodo o la composta con los metales pesados y la asimilación de éstos por las plantas.

### 3.1.4 Influencia de los microorganismos en la disponibilidad de los contaminantes

La biomasa microbiana puede también enlazar metales (Alexander, 1980). Las bacterias, actinomicetos y hongos requieren de micronutrientes como las plantas superiores y llegan a competir con éstas.



Los microorganismos tienen dos funciones opuestas en la disponibilidad de los metales en el suelo, por una parte ayudan a destruir sustancias bioquímicas quelantes volviendo disponibles los nutrientes y por otra parte inmovilizan estos mismos elementos cuando los niveles no son óptimos.

Por lo tanto los suelos que tienen una mayor actividad biológica pueden presentar mayor eficiencia para la remoción de contaminantes.

### 3.2 Barrera suelo-planta

Chaney (1980), introdujo el concepto "barrera suelo-planta" de acuerdo a la toxicidad provocada por la aplicación de lodo residual al suelo. Protege la cadena alimenticia de la toxicidad de los microelementos mediante uno o más de los siguientes procesos:

- 1) Insolubilidad de los elementos en el suelo para prevenir la absorción por las plantas.
- 2) Inmovilidad de algunos elementos en las raíces previniendo la traslocación a los tejidos comestibles de las plantas. Por ejemplo, el plomo y el mercurio son insolubles y permanecen enlazados en las fibras de las raíces y no pueden subir a las partes comestibles. El mercurio puede ser transportado del suelo al follaje de la planta, sólo por volatilización.
- 3) Fitotoxicidad es una alta sensibilidad de la planta, actúa con bajas concentraciones de metales que no son perjudiciales a los animales pero sí a las plantas.

De los elementos comúnmente encontrados en el lodo, sólo el Zn, Cu, Ni y Mn son los que pueden causar problemas de fitotoxicidad. Por ejemplo, cuando las plantas tienen de 50 a 100 ppm de níquel en sus hojas, existe una reducción del 2% en la producción del cultivo. Sin embargo la toxicidad en el ganado no ocurre hasta cuando es alimentado con 200 ppm en un período prolongado.

El Zn y Mn pueden provocar daños a las raíces y producir clorosis en las hojas maduras, además reducen el crecimiento de la planta.

En el cuadro 10, se observa la sensibilidad de diferentes cultivos a las dosis de metales pesados aplicadas con el lodo residual.

**Cuadro 10. Sensibilidad de cultivos a la aplicación de metales pesados**

Muy sensibles (1)	Sensibles (2)	Tolerantes (3)	Muy tolerantes (4)
acelga lechuga betabel zanahoria nabo cacahuete trébol alfalfa	mostaza col espinacas brócoli rábano tomate soya	coliflor pepino calabacita avena	maíz césped

- 1 Daño en 10% con una alta dosis de metales con un pH 6.5 y con un pH 5.5.
- 2 Daño en un 10% con una alta dosis de metales con pH 5.5 pero no con pH 6.5.
- 3 Daño en 25% con alta dosis de metales con pH 5.5 pero no con pH de 6.5., y no en 10% de lodo.
- 4 Sin daño aún con 25% de aplicación elevada de metales con pH 5.5.

Chaney, 1983.

En el cuadro 11 se observan los niveles de tolerancia de animales a las concentraciones de metales en comparación con los niveles en forrajes. Como se puede observar es mayor la tolerancia en animales que en plantas.

Cuadro 11. Concentración máxima de metales tolerada por ganado en comparación con los niveles en forrajes\*

Elemento	Concentración de metales en forrajes -mg en kg de forraje seco-		Niveles máximos tolerados por ganado <sup>b</sup> -mg/kg-			
	Normal	Fitotóxica	vacas	ovejas	cerdos	gallinas
As	0.01-1	3-10	50	50	50	50
B	7-75	75	150	(150)	(150)	(150)
Cd <sup>c</sup>	0.10-1	5-700	0.5	0.5	0.5	0.5
Cr <sup>3+</sup>	0.10-1	20	(3000)	(3000)	(3000)	3000
Co	0.01-0.3	25-100	10	10	10	10
Cu	3-20	25-40	100	25	250	300
F	1-5	-	40	60	150	200
Fe	30-300	-	1000	500	3000	1000
Mn	15-150	400-2000	1000	1000	400	2000
Mo	0.10-3.0	100	10	10	20	100
Ni	0.10-5	50-100	50	(50)	(100)	(300)
Pb <sup>c</sup>	2-5	-	30	30	30	30
Se	0.10-2	100	(2)	(2)	2	2
V	0.10-1	10	50	50	(10)	10
Zn	75-150	500-1500	500	300	1000	1000

\* Basado en la literatura reunida por Chaney, J.L. 1983. Potential effects of waste constituents on the food chain. In J.J. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kla (eds.) and Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ.

<sup>b</sup> Basado en NRC(1980). Un consumo continuo de minerales en alimentos en concentraciones con niveles máximos puede causar efectos tóxicos. Los niveles en paréntesis fueron calculados por extrapolación entre especies animales.

<sup>c</sup> Los niveles máximos tolerados estuvieron basados en el Cd o Pb en riñones, hígado y huesos en comidas para humanos más que por la simple tolerancia por los animales.

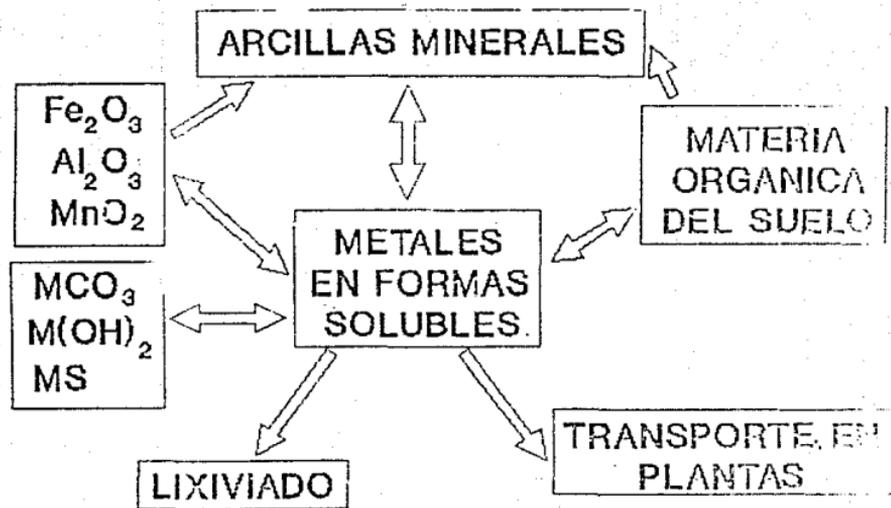
La barrera "suelo-planta" no protege a la cadena alimenticia de todos los elementos tóxicos. Por ejemplo el Cd es absorbido por los cultivos sin ningún perjuicio, pero cuando los animales consumen estos vegetales puede resultar perjudicial para su salud.

Por otra parte algunos elementos son insolubles y la salud animal no está en peligro, aun si el suelo es ingerido, por ejemplo Zr, Ti, Al, Sn y Si. Sin embargo, la digestión directa del suelo con residuos que contengan gran cantidad de Cu, Fe, Zn, Pb, Fe<sup>2+</sup>, As, Co y Hg, pone en peligro al ganado.

### 3.3 Camino de dispersión de los contaminantes en el suelo

El camino que siguen los metales pesados a través del suelo y de plantas se muestra en la lámina 17. Los metales disponibles a las plantas y los que son susceptibles a ser lixiviados están presentes en la solución del suelo como iones metálicos libres (M<sup>2+</sup>), complejos (MOH<sup>+</sup>, MCl<sup>+</sup>, etc.) y quelatos (M-ácido fúlvico).

Cuando se lleva a cabo el transporte de metales a las plantas o son lixiviados, la solución del suelo busca un reequilibrio con la fase sólida, lo que ayuda a mantener constante la concentración de estos elementos en la solución del suelo. Este equilibrio es regulado por factores tales como pH.



Fuente: EPA, 1986a

Lámina 17. Camino que siguen los metales pesados a través del suelo y de las plantas

Los metales en la solución del suelo están constantemente interactuando formando precipitados (carbonatos, hidróxidos, fosfatos) con la materia orgánica del suelo o adsorbidos por las arcillas minerales.

#### 3.4 Comportamiento de patógenos en el suelo

El comportamiento de patógenos en el suelo está regulado por las condiciones físicas, químicas y biológicas presentes en determinado tipo de sustrato y el tipo de suelo.

Algunas de las variables físicas son: contenido de humedad, temperatura, luz solar, permeabilidad y aereación. Entre las variables químicas y biológicas se encuentra el pH, materia orgánica y otros microorganismos en el suelo.

Temperaturas bajas provocan que las bacterias entren en un estado de latencia, temperaturas altas pueden provocar una disminución en las poblaciones microbianas.

En suelos ácidos (pH 3.5), el tiempo de supervivencia es más corto que en un suelo alcalino o neutro, ya que la mayor parte de los patógenos toleran pHs en un rango de 6.5 y 7.7 (Pelczar, Michael J., et al. 1991).

La radiación solar juega un papel muy importante en el control de patógenos en el suelo, ya que destruye las bacterias que se encuentran localizadas sobre su superficie.

Un suelo con humedad aumenta la supervivencia de las bacterias, por el contrario la desecación de las células microbianas produce su reducción (Pelczar, Michael J., et al. 1991).

La competencia y depredación entre los microorganismos en el suelo disminuyen el tiempo de supervivencia bacteriana, los protozoarios son el principal depredador de las bacterias coliformes.

##### 3.4.1 Supervivencia

Los tratamientos aplicados al lodo residual reducen el número de patógenos. Muchos de los microorganismos se mueren durante el tratamiento o al ser aplicados en el suelo. Por ejemplo las enterobacterias o los virus no tienen estructuras esporuladas que les defiendan contra la desecación, como sucede con las bacterias y hongos. Los virus además, no se replican fuera de su hospedero.

De las enterobacterias solamente la Salmonella y Shigella son capaces de crecer tanto en el lodo como en el suelo. Además estos organismos presentan competencia entre sí y con otros microorganismos saprófitos o termofílicos, lo que hace difícil su supervivencia. Sin embargo, es posible encontrarlos en el lodo tratado y suelo donde es aplicado (PAHO, WHO and EHP, 1989).

Los factores que causan la inactivación de las bacterias y virus en el sistema suelo/suelo han sido poco estudiados. Sin embargo se han encontrado indicios de que la concentración de amoníaco y la depredación se encuentran entre los más importantes.

El amoníaco que es producido por la descomposición microbiana de los compuestos nitrogenados incrementa su nivel a medida que este proceso se lleva a cabo. Esto provoca la elevación del pH con la conversión de una cantidad considerable de ion amoníaco a amonio, que tiene una alta solubilidad en el agua. El amonio es efectivo en la inactivación de las cadenas de RNA de los virus (PAHO, WHO and EHP, 1989).

Se ha demostrado que las bacterias, protozoarios y nematodos presentes en el suelo, destruyen a los patógenos como virus y enterobacterias por depredación.

Otras condiciones como la aeración pueden favorecer o perjudicar la persistencia de patógenos. Los virus bajo condiciones anaeróbicas son menos susceptibles a la degradación por microorganismos que en condiciones aeróbicas (PAHO, WHO and EHP, 1989).

Los quistes de los protozoarios son susceptibles a la destrucción por secado. Se ha encontrado que los trofozoítos de *Entamoeba histolytica* son capaces de persistir ocho días en el suelo, pero menos de tres días cuando han sido expuestos sobre la superficie de los vegetales.

Los huevos de *Ascaris*, sin embargo, son los que tienen mayor tiempo de supervivencia, más de siete años en el suelo, cuadro 11.

#### 3.4.2 Movilidad

La movilidad de los patógenos, a través del suelo, comienza cuando entran en contacto con el suelo y durante la erosión del mismo.

El movimiento se ve favorecido por el movimiento del agua. La infiltración y percolación a través del suelo provocan una selección de patógenos. Los más grandes como los huevos de helmintos y quistes de protozoarios se quedan retenidos en las capas superficiales, en suelos arenosos su paso se ve facilitado (PAHO, WHO and EHP, 1989).

Cuadro 12. Supervivencia de patógenos en suelos y plantas

Organismo	Medio	Supervivencia
Coliformes	-Superficie del suelo -vegetales -pasto y trébol	38 35 6-34
<i>Streptococcus</i>	Suelo	35
<i>Streptococcus faecalis</i>	Suelo	26-77
<i>Salmonella, sp</i>	Suelo vegetales y frutos pasto y trébol	15-280 3-49 12-42
<i>Salmonella typhi</i>	Suelo vegetales y frutos	1-120 < 1-68
<i>Shigella, sp</i>	Pasto (lodo crudo) vegetales suelo con humus	42 2-10 160
Bacilo de tuberculosis	Suelo pasto	> 180 10-49
<i>Vibrio cholerae</i>	Vegetales y frutos agua y lodo	< 1-29 5-32
<i>Leptospira, sp</i>	Suelo agua lodo	15-43 5-32 30
<i>Entamoeba histolytica</i> Quistes	Suelo vegetales agua	6-8 < 1-3 8-40
Enterovirus	Suelo	8
Huevos de <i>Ascaris</i>	Suelo vegetales y frutos	arriba de 7 años 27-35
Larvas de anquilostoma (lombriz intestinal)	Suelo	42
Polivirus	Agua contaminada a 20°C	Pocas semanas
Cisticercos de tremátodo (parásito del hígado)	En pasto seco En pasto que no ha sido secado	Pocas semanas Más de un año

Ercuin, E. et al. 1976.

### 3.5 Usos y Recomendaciones

La composta de lodos residuales puede ser utilizada en agricultura, jardinería, viverismo y en la recuperación de áreas erosionadas. Su uso sólo se encuentra restringido por la presencia de contaminantes que pueden afectar la cadena alimenticia, lo que puede controlarse con la selección de cultivos y una dosificación adecuada del producto de acuerdo a las características del suelo y a los nutrimentos requeridos por las plantas.

#### 3.5.1 Mercado Potencial

Existe una búsqueda permanente para localizar fuentes disponibles y baratas de materia orgánica para ser usada en cultivos hortícolas y ornamentales. Por ejemplo en el Estado de Morelos hay una demanda de aproximadamente 300 ton/día de tierras orgánicas por parte de los 2000 viveristas de la región.

Por otra parte hay una auge en la construcción de plantas de tratamiento que producen lodos residuales. En Morelos hay dos plantas construidas ECCACIV y la planta de tratamiento de Cuautla y para 1994 se tiene proyectada la puesta en marcha de la planta de Cuernavaca con una producción de 75 ton/día de lodo. Estos lodos pueden ser tratados por composteo y suplir una parte de la demanda actual de suelos orgánicos.

Para lograr desarrollar e implantar un sistema de composteo es necesario establecer un mercado para el producto. Por lo tanto, hay que definir un uso que contemple las características tanto positivas como negativas.

En el mercado existen gran cantidad de sustratos para el cultivo de plantas, desde abonos hasta mezclas de sustratos para el crecimiento de cultivos especiales. Estos productos se distribuyen en supermercados y tiendas de agricultura y jardinería. Son utilizados por áreas de casa, viveristas y agricultores.

Por otra parte muchos de éstos son importados y generan una fuga de divisas. Ante esto es necesario el desarrollo de biotecnología nacional para la producción de sustratos, que dé abasto a la creciente demanda del mercado.

El mercado se puede dividir en productos a granel y productos envasados.

Los sustratos generalmente vendidos como productos a granel son extraídos de bancos de tierra, localizados principalmente en áreas boscosas como son la hoja de encino y de pino.

Otros productos como los abonos de animales vacuno, ovino, porcino y gallinaza, también son utilizados.

Algunos otros provienen de extracciones minerales como tezontle (lava volcánica), arena y cacahuatillo (material de baja densidad parecido a la piedra pomez) que se emplean junto con sustratos orgánicos.

Son aprovechados también productos de desecho agroindustrial como bagazo de caña y viruta. El costo por metro cúbico de estos productos varía de N\$35.00 (tierra de lama) a N\$100.00 (cacahuatillo), (precios de 1991, en Cuernavaca y Jiutepec, Morelos).

Si el tamaño de las partículas es controlado y se preparan mezclas adicionando tierras orgánicas y fertilizantes, se puede obtener un sustrato con propiedades físicas y químicas aceptables que puede ser envasado y aumentar el valor agregado de la composta. Los productos envasados se distribuyen en supermercados y tiendas de agricultura y jardinería. Estos productos son utilizados por viveristas y amas de casa en cultivos especiales.

Los sustratos se envasan después de un proceso de esterilización y se venden en bolsas de polietileno con capacidad de 5, 10, 15 y 20 litros.

### 3.5.2 Dosis recomendadas

Experiencias en el uso de la composta en otros lugares revclan resultados positivos con varios usos como son, cultivos de pastos, árboles y plantas ornamentales.

Las plantas y césped producidos con composta de lodo desarrollan raíces más grandes. Son trasplantados con baja mortalidad y se venden más rápidamente que aquellos en los cuales se utiliza solamente fertilizante.

Resultados sorprendentes pueden observarse con el uso de la composta para la recuperación de suelos erosionados y la reforestación. En los cuadros 13(a) a 13(c) se recomiendan porcentajes de aplicación para diferentes usos.

Cuadro 13(a) Usos y dosis de aplicación de la composta de lodo residual para obtener beneficios fertilizantes y acondicionadores

USO	Kg composta/m <sup>2</sup>	RECOMENDACIONES
<u>Césped</u>		
Establecimiento: Preparación de mezclas con suelo	9.7-29.2	Incorporar en una capa de suelo de 10 a 15 cm. Usar la dosis mínima cuando el suelo es fértil y la cantidad máxima cuando el suelo es poco fértil.
Preparación de una capa superficial para siembra de semillas.	2.9-3.4	Esparcir uniformemente sobre la superficie antes de sembrar las semillas de pasto, cuando éstas son pequeñas, y encima cuando son grandes.
Mantenimiento:	1.9-3.8	Esparcir uniformemente sobre la superficie. En la estación fría; aplicar la dosis alta en otoño o una dosis baja en otoño y otra igual al comenzar la primavera.
<u>Producción de Césped:</u>		
Incorporada	14.6-29.2	Incorporar con una capa de suelo de 10-15 cm.
No incorporada	29.2-87.7	Aplicar uniformemente a la superficie. Irrigar para la germinación y establecimiento.
Establecimiento	4.8-14.6	Incorporar dentro de la superficie 1 o 2 semanas antes de la plantación. No debe excederse la cantidad de nitrógeno recomendada para el cultivo.

Cuadro 13(b) Usos y dosis de aplicación de la composta de lodo residual para obtener beneficios fertilizantes y acondicionadores

USO	Kg composta/m <sup>2</sup>	RECOMENDACIONES
Mantenimiento	4.8	Cada año después del establecimiento incorporar dentro de la superficie, 1 o 2 semanas antes de la plantación.
Cultivo de: cebada, avena, centeno, trigo	48-63 ton/ha	Incorporar con el suelo 1 o 2 semanas antes de la plantación.
Maíz	146-185 ton/ha	Incorporar con el suelo 1 o 2 semanas antes de la plantación. Puede ser requerida por el suelo una cantidad adicional de nitrógeno depende de su concentración inicial en el suelo.
Legumbres <sup>1</sup> :		Las legumbres pueden ser cultivadas en
Alfalfa		rotación con maíz,
Soya		avena u otros cultivos que requieran nitrógeno.
Pastos forrajeros:		
Establecimiento	195-341 ton/ha	Incorporar en una capa de suelo de 10 a 15 cm. Usar la dosis baja en suelos relativamente fértiles y la dosis alta en suelos poco fértiles. Adicionar durante el primer año de crecimiento 20 kg de fertilizante nitrogenado cuando sea necesario.
Mantenimiento	48-63 ton/ha	Esparcir uniformemente sobre la superficie en el otoño o al inicio de la primavera, cada año después de la primera aplicación.

Cuadro 13(c) Usos y dosis de aplicación de la composta de lodo residual para obtener beneficios fertilizantes y acondicionadores

USO	Kg composta/m <sup>2</sup>	RECOMENDACIONES
Cultivos de semillero, ornamentales (arbustos y árboles):	9.3-34.1	Incorporar a una capa de suelo de 15.24 a 20.32 cm. No usar con plantas que crezcan en suelos muy ácidos como las azaleas y rododendros
Mantenimiento:	0.97-2.4	Esparcir uniformemente sobre la superficie del suelo. Puede ser incorporada con el suelo o puesta sobre él.
Mezclas para vivero <sup>1</sup> :		
	Materiales en partes iguales: -Composta de lodo+ peatmoss + vermiculita -Composta + peatmoss + arena -Composta + suelo franco	Hacer riegos intensivos varias veces en las mezclas preparadas para prevenir la fitotoxicidad provocada por algunas sales.
Recuperación de suelos:		
Mantenimiento de la plantación	Arriba de 45 ton/ha	Incorporar a una capa de suelo de 15 cm. Usar una dosis máxima sólo cuando se desea un crecimiento rápido en la etapa de establecimiento de la plantación.
	136-317	Colocar composta cribada o sin cribar sobre la superficie del suelo después de la siembra de semillas; la composta cribada es más efectiva.

- 1 Para obtener un máximo de beneficio de la composta como fertilizante se recomienda la rotación.
- 2 Las mezclas más efectivas son aquellas que contienen volúmenes iguales de: composta + peatmoss (turba), composta + peatmoss + arena, o composta + suelo infértil.

Willson, G. et al. 1980.

#### 4 CRITERIOS Y NORMAS PARA EL USO DE COMPOSTA Y LODOS RESIDUALES

##### 4.1 Criterios y normas existentes en México

México tiene una nueva Ley General sobre el Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental que fue promulgada en 1988. Esta prohíbe la disposición de materiales y desechos peligrosos, pero permite su tratamiento y utilización si se sujetan a los criterios contenidos en las leyes y normas.

En el mismo año la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología formuló la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-001/88, que establece los criterios para el análisis de residuos peligrosos y su listado (SEDUE, 1990). Esta norma técnica es de observancia obligatoria cuando se generan residuos que son considerados peligrosos. Para la determinación de los residuos peligrosos, la norma contempla criterios de acuerdo a las características de corrosividad, toxicidad, reactividad, explosividad e inflamabilidad.

En el artículo 4 se encuentran descritas las definiciones de estas características. También se define la toxicidad al ambiente de un residuo y se enlistan una serie de constituyentes y sus concentraciones máximas.

En el cuadro 14, se pueden apreciar algunos de los contaminantes y su concentración máxima permitida.

Cuadro 14. Contaminantes y sus concentraciones máximas contenidos en la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-001/88 emitida por SEDUE.

Constituyente	Concentración máxima permitida (mg/l)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Benceno	0.07
Cadmio	1.0
Cromo	5.0
Endrín	0.003
Fenol	14.4
Heptacloro y su epóxido	0.001
Mercurio	0.2
Plomo	5.0
Bifenilos	50.0

En el Artículo 5o. se enlistan algunos residuos peligrosos entre los que se encuentran los lodos de oxidación de tratamiento de aguas residuales. Esto constituye un avance en la legislación debido a que no había sido considerada la existencia del lodo de manera independiente, y marca un precedente para que éste sea tratado.

#### 4.2 Criterios y normas existentes en Estados Unidos de América

En este inciso se revisan los criterios y normas que la Agencia para la Protección del Ambiente (EPA), ha determinado para el manejo y uso del lodo y compostas. La legislación de este país es más detallada ya que ha habido un auge, durante las tres últimas décadas, sobre el uso de lodo residual en suelos agrícolas.

Debido al impacto provocado por la contaminación del lodo en diferentes ambientes -la atmósfera, agua y suelo-, las leyes que regulan su manejo son varias. En seguida se hace una descripción (tomada de EPA, 1979), de cada una de ellas.

La Ley Federal para el Control de la Contaminación del Agua de 1972 (Federal Water Pollution Control Act) es la encargada de establecer el tipo de tratamiento, y penalidades para los infractores. Esto ha traído como consecuencia que al aumentar la eficiencia en los sistemas de tratamiento de agua, la generación de lodos aumente y también las necesidades en su manejo.

En plantas que descargan a aguas superficiales, se otorgan permisos por el Sistema Nacional para la Eliminación de las Descargas Contaminantes (National Pollutant Discharge Elimination System NPDES).

Entre las normas que regulan el manejo de lodos residuales se encuentran las contenidas en la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) la que considera los requisitos para incineración. Las Enmiendas a la Ley del Aire Limpio de 1970 y 1977 contienen disposiciones para la regulación de emisiones de fuentes puntuales, por ejemplo, emisiones de incineradores. Estos límites de emisiones pueden afectar cualquier sistema de tratamiento, por ejemplo los procesos de secado y de incineración de gases de digestores anaerobios.

La EPA ha emitido los Estándares de Calidad para la incineración del lodo (40 Current Federal Regulation, CFR 60-150) y "Enmiendas a los Estándares Nacionales de Emisiones" (40 CFR 61-52). Estas normas establecen restricciones particulares de emisiones contaminantes del aire, y limitan las emisiones de mercurio en incineradores y secadores de lodos residuales.

Un aspecto interesante que se debe recalcar es que cuando los requerimientos estatales y locales son más restrictivos que las regulaciones federales, los primeros tienen preferencia.

La Ley del Agua Limpia de 1977 (Clean Water Act) contiene dos grandes medidas para el uso y disposición de lodos. La sección 405 confiere a la EPA la obligación de diseñar normas y reglamentos para su disposición y uso. La Sección 307 favorece su aprovechamiento al exigir el pretratamiento de desechos industriales si estos inhiben el tratamiento del agua residual o su uso.

La Ley para la Conservación y Recuperación de los Recursos (Resource Conservation and Recovery Act RCRA) de 1976, exige que los desechos sólidos sean utilizados o dispuestos de manera segura para el ambiente. La EPA constantemente genera disposiciones para poder llevar a cabo estas medidas. Estas disposiciones están comprendidas en tres categorías:

- a) Tratamiento y disposición de desechos sólidos potencialmente peligrosos.
- b) Criterios y estándares para las compañías dedicadas a la disposición de desechos sólidos.
- c) Criterios para definir los límites de aplicación de los residuos sólidos a suelo agrícola.

La EPA debe realizar estas actividades bajo las normas establecidas en la RCRA y la Sección 405 de la Ley del Agua Limpia.

La Ley para el Control de Sustancias Tóxicas de 1976, autoriza a la EPA para hacer pruebas en la industria sobre determinadas sustancias químicas y regularlas si son peligrosas. Esta ley, en combinación con otras, ayuda a disminuir la cantidad de contaminantes descargados al sistema de drenaje municipal por procesos industriales. Un ejemplo de esto es que la ley prohibió la producción de bifenil policlorinados (BPCs) después de enero de 1979, y su distribución comercial después de julio de 1979.

Algunas ciudades cercanas al mar como New York y Philadelphia, así como el área de New Jersey disponían sus lodos transportándolos al mar. En 1977 las enmiendas a la Ley de Santuarios, Protección Marina e Investigación, así como también otras leyes prohibieron la disposición de lodo residual al mar. Después del 31 de diciembre de 1981 fueron retirados los fondos federales para la construcción de sistemas de disposición al mar por barco o acueducto.

La Ley Nacional de Política Ambiental de 1969, exige que los gobiernos federales consideren los efectos de sus acciones con respecto al tratamiento de agua residual y los sólidos generados. Actualmente los fondos federales se otorgan, principalmente, a los tratamientos que consideran el uso del lodo.

Otras leyes que afectan el manejo de los lodos son:

-Ley sobre Seguridad del Agua Potable (que trata sobre la protección del agua de consumo humano y el acuífero).

-Ley Nacional sobre la Protección del Ambiente (que trata sobre impacto ambiental).

-Ley Federal de Alimentos, Drogas y Cosméticos (que trata sobre la contaminación de productos alimenticios).

#### 4.3 Requerimientos del lodo residual para ser aplicado en suelo agrícola

Para poder ser utilizado el lodo residual en forma directa o a través de la composta, es necesario que cumpla con ciertas normas de calidad sanitaria.

Algunos procesos de manejo de lodo no tienen efecto sobre la concentración de sus contaminantes, mientras otros la aumentan o disminuyen.

La simple remoción de agua (secado por gravedad o desecado) no cambia la concentración (masa de contaminantes/masa de sólido) de contaminantes en el lodo. Pero la digestión y otros procesos de estabilización que disminuyen la fracción volátil del lodo incrementan la concentración de contaminantes no biodegradables. La adición de materiales tales como: acondicionadores usados en el composteo o químicos para estabilización, disminuye la concentración de metales o en sus productos.

Algunos tóxicos pueden ser biodegradados por procesos de estabilización o pueden ser removidos del lodo por volatilización. Sin embargo, los datos sobre los mecanismos de pérdida de contaminantes orgánicos son muy limitados.

El objetivo del tratamiento del lodo es proveer las características para que éste pueda tener una disposición o uso adecuado.

En los siguientes párrafos se describen los principales requerimientos exigidos por la EPA para la aplicación del lodo o composta al suelo.

##### 4.3.1 Reducción de patógenos

Para poder ser aplicado el lodo al suelo deberá ser tratado por medio de uno o varios procesos de reducción de patógenos que alcancen los requerimientos de la 40 CFR Part 257.

Los tratamientos de lodos se dividen en Procesos de Reducción Significativa de Patógenos (PRSP) y Procesos con Reducción Adicional de Patógenos (PRAP). En los cuadros 15 y 16, se pueden observar éstos y las condiciones de operación necesarias.

La remoción de patógenos en las dos diferentes clases de procesos, y de acuerdo a esto las restricciones de uso del lodo en suelo agrícola, se aprecian en el cuadro 17. Los PRAP generalmente operan a más altas temperaturas que los PRSP.

Cuadro 15. Procesos y condiciones de operación para lograr una reducción significativa de patógenos (PRSP)

Proceso	Condiciones de operación			
	Temperatura °C	Tiempo de retención (días)	Reducción de sólidos volátiles	Otros
Digestión aerobia	15-20	40-60	38	
Lecho de secado	>0	90	-	Capa de 23 cm
Digestión anaerobia	20-35	15-60	38	
Composteo	40	21 etapa termofílica 31 curado		Durante 24 hrs. la temperatura excederá de 55°C
Encalado	-	-	-	Dos horas de contacto

Nota: Otros procesos pueden quedar incluidos si alcanzan una reducción de sólidos volátiles de 38°C y si los patógenos y los vectores de atracción se reducen a niveles equivalentes de los procesos mencionados.

Es conveniente remover el suelo donde se ha aplicado el lodo, tratado por PRSP, por lo menos 2 o 3 veces para exponerlo al aire y a la luz del sol, esto ayuda a desecar los patógenos. Estas recomendaciones no son necesarias si el lodo es tratado por PRAP.

Cuadro 16. Procesos y condiciones de operación para lograr una reducción adicional de patógenos (PRAP)

Proceso	Condiciones de operación			Otras especificaciones
	Temperatura °C	Tiempo de retención (días)	Reducción de sólidos volátiles	
Composteo: -Reactor -Pila estática  -Camellón	55 o más durante 3 días consecutivos  55 o más durante 15 días	Etapa termofílica 21 Curado 31	38	En el camellón durante el período de digestión se necesita remover el material 5 veces
Secado por calor	80			Reducción de humedad del 10% o menos
Tratamiento con calor	180	30 minutos		
Digestión aeróbica termofílica	55-60	10	38	
Irradiación de rayos beta	20			Menos de 1.0 megared
Irradiación de gama	20			Menos de 1.0 megared
Pasteurización	70	30		

Nota: otros procesos pueden quedar incluidos si alcanzan una reducción de sólidos volátiles de 38% y si los patógenos y los vectores se reducen a niveles equivalentes de los procesos mencionados.

**Cuadro 17. Remoción de patógenos obtenida con los procesos de reducción significativa de patógenos (PRSP) y con los de reducción adicional (PRAP)**

PATOGENOS	P R O C E S O S	
	PRSP <sup>1</sup> Remoción Signifi- cativa de patógenos	PRAP <sup>2</sup> Remoción Adicional de Patógenos
Reducción de sólidos volátiles	38%	38%
Coliformes fecales	1.4 log	<100 NMP/g SSV
Enterococos	1.4 log	<NMP/g SSV
Salmonella	1.0 log	<3 NMP/100 ml
Huevos de helmintos	-	-1 huevo viable de Ascaris, spp. en 100 ml
Enterovirus	1.0 log	1 UFP/100 ml para el total de enterovirus

1 Restricciones de uso, impedir el acceso al público por lo menos 12 meses y se deberá prevenirse el pastoreo de animales cuyos productos son consumidos por humanos, por lo menos un mes después de la aplicación del lodo en el suelo.

2 No se aplica ninguna restricción.

Nota: Las restricciones de uso tienen como objeto prevenir que los patógenos no penetren en la cadena alimenticia.

#### 4.3.2 Concentración de metales pesados

Debido a la diversidad de tratamientos que pueden ser aplicados al lodo residual, es posible obtener un material de diferente calidad. La presencia de contaminantes en niveles de concentración le da un grado de calidad que va de mayor a menor, con lo cual se logra definir diferentes usos para cada grado.

En el cuadro 18 se observan los límites de contaminantes para cada categoría. El grado uno y dos, son lodos de la mejor calidad y pueden ser usados sin restricción en la agricultura. El tres y el cuatro sólo son usados en la recuperación de suelos erosionados o en áreas forestales.

Cuadro 18. Clasificación de la calidad del lodo para aplicación agrícola, de acuerdo a la concentración máxima permitida de metales pesados

METAL	Concentración máxima mg/kg			
	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
Cadmio	25	55	125	-
Cromo	1 000	1000	1 000	-
Cobalto	250	-	-	-
Cobre	1 000	1450	2 562	-
Plomo	1 000	2 000	3 400	-
Litio	500	-	-	-
Manganeso	2 500	-	-	-
Mercurio	10	10	10	-
Níquel	200	575	1 125	-
Selenio	7	-	-	-
Cinc	2 000	2 913	5 625	-

Nota: El lodo de calidad, Grado 4, no tienen ningún valor restrictivo, se usa sólo en suelos altamente erosionados.

#### 4.3.3 Concentración de tóxicos orgánicos

Son varios los efectos tóxicos de los compuestos orgánicos, que pueden afectar desde el sistema dermatológico al nervioso, sin dejar de considerar problemas carcinogénicos. El grado de toxicidad varía de moderadamente tóxicos (alcoholes) a extremadamente tóxicos (dioxinas).

En la remoción de tóxicos orgánicos también encontramos que la calidad del lodo varía según el proceso de lodo residual utilizado (ver cuadro 19). De igual forma que en los metales pesados el lodo de grado 1 y 2 puede ser utilizado en cultivos agrícolas, y en zonas forestales el 3 y 4. Las normas también mencionan que:

-Los lodos que tienen BPC's (bifenil policlorinados) en niveles igual o mayores de 10 mg/kg (peso seco) deben ser incorporados dentro del suelo. En especial cuando son aplicados a cultivos que sirven como forraje para animales que producen carne o leche.

-No se requiere incorporar el lodo al suelo si se demuestra que la concentración es menor de 0.2 mg/kg en tejidos animales o 1.5 mg/kg (base en grasa) en la leche.

-El lodo con más de 50 mg/kg de BPCs debe ser colocado en un relleno para residuos químicos o incinerado bajo condiciones especiales, como lo establece la 40 CFR 761, subparte D para la disposición de BPC.

Cuadro 19. Clasificación de la calidad del lodo para aplicación agrícola de acuerdo a las concentraciones máximas permitidas de tóxicos orgánicos

Tóxicos orgánicos	Concentraciones máximas (mg/kg)			
	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
Clordano	0.10	0.10	>0.10	0.0
Dieldrin	0.10	0.10	0.00	0.00
Endrin	0.10	0.10	>0.10	0.00
Heptacloro	0.10	0.10	>0.10	0.00
Epóxido	0.10	0.10	>0.10	0.00
Lindano	0.10	0.10	>0.10	-
Metaxiclolo	0.25	0.25	>0.25	-
Mirex	0.25	0.25	>0.25	-
P, P'				
-DDE	0.25	0.25	>0.25	-
P, P'				
-DDT	0.25	0.25	>0.25	-
P, P'				
-TDE (DDD)	0.25	0.25	>0.25	-
Fenoles	10.0	-	-	-
BPC	10.0	10.0	10.0	-
Toxafeno	1.0	1.0	>1.0	-

#### 4.3.4 Control de Vectores

La Parte 257 establece que un tratamiento debe tener control sobre los vectores de enfermedades, a través de la aplicación de una cubierta protectora o de otras técnicas apropiadas.

#### 4.4 Características físico-químicas requeridas en el suelo agrícola o forestal para la disposición de lodo y composta

El suelo tiene propiedades que le permiten regular la toxicidad de los contaminantes, como son el pH, capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica. Otras características físicas del sitio de disposición que deben ser consideradas son la topografía y la distancia del terreno a las fuentes de agua más cercanas.

##### 4.4.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH de la mezcla lodo suelo (hasta 15 cm de profundidad), debe ser controlado para evitar problemas de fitotoxicidad. El nivel de pH que se considera que es efectivo para reducir la disponibilidad de metales es de 6.5 (EPA, 1988b). Este valor es un requisito de la EPA para la aplicación de lodo en el suelo donde se van a sembrar cultivos comestibles.

#### 4.4.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico proporciona un equilibrio o un poder amortiguador con respecto a la acumulación de metales en suelos agrícolas.

En el cuadro 20, se observan los límites máximos de metales para suelos con diferentes tipos de capacidad de intercambio catiónico.

Cuadro 20. Concentraciones máximas (kg/ha) de metales, permitidas en la aplicación al suelo de acuerdo a su capacidad de intercambio catiónico

Metal	Capacidad de intercambio catiónico meq/100g		
	0-5	5-15 (meq/100 g)	15
Cadmio	5	10	20
Níquel	50	100	200
Cobre	125	250	500
Zinc	250	500	1,000
Plomo	500	1,000	2,000

Los límites del cadmio están contenidos en la norma (40 CFR Parte 257). La aplicación anual de cadmio no deberá exceder de 0.5 kg/ha. Todas las recomendaciones se aplican sólo a suelos cuyo pH haya sido ajustado a 6.5 cuando el lodo es aplicado, y no menos de 6.5 después de la aplicación.  
EPA, 1988b.

#### 4.4.3 Materia orgánica (M.O.)

Se debe tomar en cuenta el contenido de materia orgánica en el suelo debido a que se ha encontrado que regula la disponibilidad de metales que son absorbidos por las plantas. Entre mayor sea su contenido en el suelo, podrá ser capaz de recibir más cantidad de lodo. Sin embargo no es un parámetro regulado por alguna normatividad.

#### 4.4.4 Profundidad del acuífero

Para proteger el acuífero, sólo 10 estados de la Unión Americana tienen restricciones para la aplicación de lodo.

Maryland y Wyoming 2 pies (0.6 m). Massachusetts y Nevada 4 pies (1.22 m). California 5 pies (1.52 m). New Hampshire y Vermont 6 pies (1.83 m). Colorado 10 pies (3.05 m). Minnesota requiere de 8 pulgadas (0.20 m) de capacidad de retención de agua arriba de la altura estacional del espejo de agua. Carolina del Sur exige consideraciones sobre la hidrogeología para establecer las condiciones de diseño del sistema de disposición.

Estas restricciones evitan que las aplicaciones del lodo no controladas provoquen un exceso de contaminantes disponibles en el primer o segundo año después de su aplicación.

Un acuífero estacional requiere de menor protección. Para lograr una protección adicional, si el acuífero está inmediatamente bajo el sitio de aplicación se deberá considerar el monitoreo que se marca en la 40 CFR Part 257. Este requiere de que la aplicación del lodo no contamine el acuífero, que es una fuente de agua de consumo humano con:

-Nitratos en concentraciones iguales o mayores que 10 mg/l.

-Sólidos disueltos mayores 10 000 mg/l.

#### 4.4.5 Distancia de los sitios de aplicación a aguas superficiales

Para proteger las aguas superficiales de la contaminación que pudiera ocasionar la aplicación de lodo en el suelo, se tienen varias recomendaciones relacionadas con la pendiente del sitio. Estas se resumen en el cuadro 21.

Cuadro 21. Porcentajes de pendientes para la aplicación de lodo residual

Pendiente	Comentarios
0-3%	Es ideal, no es propicia para escurrimientos o erosión del lodo líquido o con un porcentaje de sólidos mayor.
3-6%	Aceptable, riesgo ligero de erosión.
6-12%	Se requiere que el lodo sea inyectado en el suelo, si es líquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Es más recomendable la aplicación de lodo desaguado.
12-15%	No se recomienda aplicación de lodo líquido sin un debido control de escurrimientos, es más recomendable la aplicación de lodo desaguado, pero con su inmediata incorporación al suelo.
>15%	Pendientes mayores de 15% son recomendables sólo cuando el suelo tiene una buena permeabilidad y donde la longitud de la pendiente es corta y constituye la menor parte del área total de aplicación.

La aplicación a sitios forestales con una buena cubierta vegetal y pendientes que no excedan de 30% es aceptable; se debe prohibir la aplicación del lodo en la estación húmeda en sitios con una pendiente mayor de 15%.

Para evitar el escurrimiento del lodo hacia el agua superficial se requiere de una área amortiguadora entre el área de aplicación del lodo y los cuerpos de agua. Esta área tiene dos propósitos:

-Proveer de un factor de seguridad contra errores durante la aplicación del lodo.

-Proveer de un tratamiento y filtrado del lodo y/o escurrimiento del lodo que ha sido aplicado en la superficie.

El tipo de suelo del área amortiguadora es un factor en la determinación del tamaño del área. Por ejemplo, un suelo alterado no provee de un filtro amortiguador, mientras que un bosque no perturbado ofrece un excelente tratamiento.

Así el tamaño del área amortiguadora depende del método de aplicación del lodo, el agua superficial que está siendo protegida y la condición del suelo superficial, cuadro 22.

Cuadro 22. Condiciones requeridas para la zona amortiguadora

Aplicación de lodo Método/zona amortiguadora, Condiciones	Tipo de cuerpo de agua			
	Grande con flujo con- tínuo	Pequeño tribu- tario	Efímero	Zanja
1. Aplicación superficial:				
-zona amortiguadora sin perturbar	6 096 m	3 048 m	1 524 m	762 m
-zona amortiguadora perturbada	6 096 m	6 096 m	3 048 m	1 524 m
2. Lodo inyectado/ incorporado	3 048 m	3 048 m	1 524 m	762 m

EPA, 1988b.

#### 4.4.6 Distancia a pozos

Con el fin de proveer un margen de seguridad para los pozos que abastecen zonas urbanas o agrícolas, se deberá considerar una distancia mínima del sitio de aplicación al pozo más cercano de 300 a 1,500 pies (91.44 a 457.2 metros), EPA, 1988b.

#### 4.4.7 Planicies de inundación

La EPA en 1980 recomendó que para evitar cualquier contaminación provocada por la aplicación del lodo a tierras de inundación, este debería ser incorporado dentro del suelo y garantizar una rápida reforestación del sitio. Posteriormente para proteger las aguas superficiales y el acuífero se prohibió la aplicación de lodo en suelos inundables (EPA 1988b).

#### 4.4.8 Limitaciones estacionales

La EPA 1988, recomienda que la aplicación del lodo no deberá llevarse a cabo durante los eventos de tormenta cuando la precipitación excede de 1/4 de pulgada por hora (0.63 cm). También se aplica a suelos congelados o cubiertos por nieve.

Por otra parte, si se combinan restricciones de pendiente y control de escurrimientos se protege el agua superficial.

#### 4.4.9 Proximidad a áreas recreativas

Se debe prohibir la aplicación del lodo, que no ha sido tratado por un proceso de reducción adicional de patógenos PRAP, a 300 pies (91.44 m) en áreas usadas por el público. Así mismo se deben poner señales para establecer que se ha aplicado lodo.

El lodo que ha sido tratado por un PRAP no requiere de área amortiguadora o control de acceso.

#### 4.5 Porcentajes agronómicos

Para el uso agrícola se asume que la composta debe ser aplicada en porcentajes agronómicos. Estos son definidos como (EPA, 1986a):

Los porcentajes de composta anual, en el cual el nitrógeno y/o fósforo suministrados y disponibles al cultivo, no excedan los requerimientos anuales de ese cultivo. Esta recomendación es válida siempre y cuando la concentración de contaminantes presentes en los lodos no exceda las normas. De no ser así se deben considerar las recomendaciones hechas para cada tipo de contaminante y las proporciones en que se encuentra.

Se tiene que tomar en cuenta la composición del lodo o composta y suelo donde van a ser aplicados.

##### 4.5.1 Nitrógeno y fósforo

Para calcular la cantidad de nitrógeno y fósforo que deben ser aplicados en el suelo se consideran los valores en porcentaje de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrógeno orgánico ( $\text{N}_o$ ) de la

composta. Se debe tomar en cuenta que a diferencia de los fertilizantes minerales, en la composta ocurre un proceso de mineralización que provee de nitrógeno durante el primer año y los años subsecuentes.

En el Anexo 2, se muestran los cálculos necesarios para saber la cantidad de composta que puede ser aplicada.

#### 4.5.2 Contaminantes

Si algún contaminante se encuentra en proporciones fuera de las normas establecidas, es necesario usar la siguiente ecuación, tomando en consideración los límites establecidos por la EPA, 1988b:

$$\text{Composta/ha} = \frac{\text{Norma (ppm)}}{(0.001) \text{ metal en composta (ppm)}}$$

#### 4.5.3 Porcentajes de aplicación de lodo en áreas forestales

Para proteger la estructura de los suelos forestales del daño causado por una aplicación con vehículos pesados y para reducir los costos, los lodos son aplicados en una sola dosis (o una serie de aplicaciones en un año) una vez cada tres o cinco años.

Una aplicación típica podría ser de 40 ton métricas por hectárea cada cinco años, promedio anual ligeramente menor que la aplicación agrícola. Tales aplicaciones proveen seguridad para que el lodo no escurra en el agua superficial y el acuífero.

#### 4.6 Monitoreo del suelo y del ambiente

Se deben tomar por lo menos dos muestras de suelo cada año para Cd y Pb.

El pH de la mezcla lodo/suelo se monitorea cuando es aplicado a cultivos de la cadena alimenticia.

Durante el primer año la capacidad de intercambio catiónico también se mide.

## 5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente se hizo el montaje de tres módulos con el objetivo de seleccionar acondicionadores y comparar la eficiencia del proceso. Con los resultados obtenidos se seleccionó el acondicionador y se instaló una planta piloto para tratar 10 toneladas de lodo.

### 5.1 Ubicación del sitio experimental

La parte experimental se llevó a cabo en la Empresa para el Control de la Calidad del Agua de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (ECCACIV), situada en Jiutepec, Mor. Esta colecta las aguas residuales de la zona industrial de CIVAC y las trata por un proceso de lodos activados. Durante este tratamiento se generan lodos, los cuales se someten a una digestión aerobia. Se flocculan con polielectrolitos y por último se desaguan con un filtro prensa. De esta forma se obtiene lodo con 20% de sólidos, adecuado para el proceso de composteo.

### 5.2 Caracterización de materiales utilizados

#### 5.2.1 Lodo

Para la caracterización, se tomó como punto de muestreo la salida del filtro prensa, debido a que es el lodo adecuado para el composteo. Se hicieron análisis a tres muestras.

La composición fisicoquímica del lodo tiene una gran variabilidad, debido a la naturaleza de las aguas vertidas, 75% son descargas de diferentes industrias y 25% son domésticas. Por ésta razón, los resultados se reportan en rangos.

En el cuadro 23, se muestran los análisis físicos efectuados al lodo.

El pH del lodo presenta poca variación, con tendencia a la neutralidad.

Su contenido de sólidos totales (23.6%), es apropiado para el proceso de composteo. El alto valor de sólidos volátiles (74.3%), nos indica que es un desecho con alta biodegradabilidad. Su marcada capacidad calorífica de aproximadamente 8 000 BTU/lb, garantiza energía suficiente para los microorganismos termofílicos, cuadro 24.

Cuadro 23. Características físicas del lodo

Parámetro	Concentración	Técnica de análisis
pH	6.8-7.3	Eléctrodo en una solución con agua destilada 1:1 y 1:5
Densidad aparente	0.86 g/ml	Probeta
Densidad real	1.56 g/ml	Picnómetro
Porosidad	25 %	Por fórmula*
Conductividad eléctrica	5.6 mmhos/cm	Conductímetro en una solución de agua destilada 1:5
Humedad	76.4 %	Evaporación
Sólidos totales	23.6 %	Evaporación
Sólidos fijos	25.7 %	Ignición
Sólidos volátiles	74.3 %	Ignición
Capacidad calorífica	6081.74 BTU/lb	Indirecta**

$$* \% P = 100 \left( 1 - \frac{DA}{DR} \right)$$

\*\* Zanoni, 1982.

La concentración de carbono orgánico es de 32.7% valor relativamente constante. Esto debido a componentes como: microorganismos y sus productos de descomposición; compuestos del influente como proteínas, polisacáridos, grasas, aceites y tóxicos orgánicos; y compuestos sintetizados durante el tratamiento del agua y lodo.

El nitrógeno total varía en un rango de 2 a 10% El nitrógeno se analizó como ion amonio ( $NH_4^+$ ), nitratos ( $NO_3^-$ ) y nitritos ( $NO_2^-$ ).

El fósforo se encuentra en un rango de 4,060 a 47,900 ppm. Se observa que 50% es fósforo orgánico, el cual forma compuestos solubles y complejos estables con las partículas sólidas del lodo, EPA 1986.

El lodo posee una capacidad de intercambio catiónico muy alta, que es de gran utilidad para aumentar las reservas nutrimentales de los suelos.

Las concentraciones de cloruros representan un problema al ser aplicado el lodo directamente al suelo. En el caso del lodo de ECCACIV, la concentración promedio de cloruros es de 14.59 meq/l.

El valor para que el agua residual pueda ser utilizada en el suelo es de < 4. Sin embargo se presentan problemas graves cuando el valor es mayor de > 10.0, Seoanez y Calvo 1978.

Cuadro 24. Composición química del lodo residual

Parámetro	Concentración	Técnica de análisis
Carbono	32.7%	Annie, modificado
Capacidad de intercambio catiónico	47.3 meq/100g	Saturación de amonio
Nitrógeno total	2-10 %	Kjeldahl
Ion amonio NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	416-2500 ppm	Kjeldahl
Nitratos	3-17 ppm	Kjeldahl
Nitritos	6-200 ppm	Kjeldahl
Fósforo total	4060-47900 ppm	Colorimétrico
Fósforo orgánico	7625-25887 pmm	Colorimétrico
Fósforo disponible	480 pmm	Colorimétrico
Ca <sup>++</sup>	32.2 meq/100g	Flamometría
Mg <sup>++</sup>	2.3 meq/100 g	Flamometría
K <sup>+</sup>	0.84-5.25 meq/100 g	Flamometría
Na <sup>+</sup>	0.76-5.45 meq/100 g	Flamometría
Sulfatos SO <sup>+</sup>	0.03-0.06 meq/100 g	Bario-sulfato
Bicarbonatos HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.20-35.6 meq/100 g	Volumétrico
Cloruros Cl <sup>-</sup>	14.59 meq/l	Titulación (Mohr)
Boratos BO <sup>-</sup>	0.055 meq/l	Reflujo (Quinalizarin)

La concentración de metales pesados no rebasa las normas establecidas por la, EPA 1988, cuadro 25. Estos elementos durante el proceso de tratamiento del agua forman compuestos insolubles que precipitan en el lodo tales, como hidróxidos, óxidos, carbonatos, fosfatos y sulfuros EPA, 1986.

Cuadro 25. Concentración de metales pesados en el lodo residual de ECCACIV

Parámetro	Concentración	Norma (EPA, 1988)
Fierro	1745-5442	78000
Cinc	650-1040	1250-1800
Manganeso	58-139	2500
Cobre	176-177	500-900
Plomo	85-752	285-1000
Cobalto	4.89-126	250
Cadmio	0.802-2.0	12.5-30
Cromo	N.D.	50-1000
Arsénico	N.D.	10
Níquel	85	100-200

Considerando la naturaleza del influente se investigó la presencia de sustancias tóxicas, tales como hidrocarburos aromáticos polinucleares y pesticidas clorados.

Los hidrocarburos aromáticos que presentan mayores concentraciones son el Fluoranteno, Acenaftileno, Acenafteno y Fenantreno. Cuadro 26.

Cuadro 26. Concentración de hidrocarburos aromaticos polinucleares en lodo

Parámetro	Fórmula química	Concentración (ppm)
Acenaftaleno	$C_{17} H_{10}$	2.25-8.4
Fluoreno	$C_{13} H_{10}$	0.17-2.2
Fenantreno	$C_{14} H_{10}$	0.87-4.4
Antraceno	$C_{14} H_{10}$	1.86-2.63
Fluoranteno	$C_{16} H_{10}$	5.4-15.18
Pireno	$C_{16} H_{10}$	1.05-1.44
Benzo (a) antraceno	$C_{18} H_{12}$	0.79-1.55
Acenafteno	$C_{17} H_{10}$	3.1-4.7
Criseno	$C_{18} H_{12}$	0.66-1.24
Benzo (b) fluoranteno	$C_{20} H_{12}$	2.24-4.2
Benzo (k) fluoranteno	$C_{20} H_{12}$	0.82
Benzo (a) pireno	$C_{20} H_{12}$	0.10

Aunque las concentraciones encontradas en los muestras son muy altas, estos compuestos, hasta el momento, no se reportan como carcinogénicos, como asevera Neff, M. J., 1979, cuadro 27. De los compuestos hallados en el lodo de ECCACIV, los más peligrosos a la salud son el Benzo (a) antraceno, el Criseno y el Benzo (b) fluoranteno.

Cuadro 27. Toxicidad de compuestos orgánicos

Compuesto	Carcinoge- nicidad	Compuesto	Carcinoge- nicidad
Antraceno	-	Acenatrileno	-
Fenantreno	-	Benzo(j) acenatrileno	++
Benzo(a) antraceno	+	Clorantreno	++++
7, 12-Dimetil benzo (a) antraceno	++++	3-metil cloranteno	-
Dibenzo(aj) antraceno	+	Naftaceno	-
Dibenzo(ah) antraceno	+++	Pireno	+++
Dibenzo(ac) antraceno	+	Benzo(a)pireno	-
Benzo(a) fenantreno	+++	Benzo (e) pireno	+/-
Fluoreno	-	Dibenzo(al)pireno	++
Benzo(a) fluoreno	-	Dibenzo(ah)pireno	+++
Benzo(b) fluoreno	-	Dibenzo(aj)pireno	-
Benzo(c) fluoreno	-	Dibenzo(cd, jk)pireno	+
Dibenzo(ag) fluoreno	+	Indeno(1, 2, 3-cd)pireno	+/-
Dibenzo(ah) fluoreno	+/-	Criseno	++
Dibenzo(ac) fluoreno	+/-	Dibenzo(b, def)	+
Fluoranteno	-	Dibenzo(def, p)criseno	-
Benzo(b) fluoranteno	++	Dibenzo(def, mno)criseno	-
Benzo(j) fluoranteno	++	antraceno	-
Benzo(k) fluoranteno	-	Perileno	-
Benzo(mno) fluoranteno	-	Benzo(ghi) perileno	-
		Coronene	-

- no carcinógeno; + - moderadamente carcinógeno; + carci-  
nógeno; + +, + + +, + + + + fuertemente carcinógeno.

Neff, M.J., 1979

Respecto a la presencia de plaguicidas organoclorados, su concentración es muy variable en el lodo residual. De los resultados obtenidos el Aldrín y Endrín aldehído, superan las normas establecidas. Es probable que estos dos plaguicidas sean usados con frecuencia en jardines o cultivos de la región, cuadro 28.

Cuadro 28. Concentración de plaguicidas organoclorados en el lodo

Plaguicida	Fórmula química	Concentración (ppm)
Alfa BHC	$C_9 H_8 Cl_6$	0.0043-0.20
Gama BHC	$C_9 H_6 Cl_6$	0.0123-2.55
Beta BHC	$C_9 H_6 Cl_6$	0.536-2.234
Heptacloro	$C_{10} H_5 Cl_7$	0.0120-0.212
Aldrín	$C_{17} H_8 Cl_6$	0.072-0.2534
Heptacloro he- póxido	$C_{10} H_5 Cl_7 O$	0.037
Endosulfan I	$C_9 H_6 Cl_6 O_3 S$	N.D.
P-P DDE	$C_{14} H_{10} Cl_4$	0.0099-0.126
Dieldrín	$C_{17} H_8 Cl_6 O$	N.D.
P-P DDD	$C_{14} H_{10} Cl_4$	0.0090-0.126
Endrín	$C_{17} H_8 Cl_6 O$	0.0262
Endosulfan II	$C_9 H_6 Cl_6 O_3 S$	0-1.922
P-P DDT	$C_{14} H_9 Cl_5$	0-0.101
Endosulfan sulfato	$C_9 H_6 Cl_6 O_4 S$	3.586-7.564
Endrín alde- hído	$C_{17} H_8 Cl_6 O$	0-0.765

### 5.2.2 Acondicionadores

Se probaron desechos agroindustriales disponibles en el estado de Morelos, como son el bagazo de caña y la cascarilla de arroz. Estos materiales y el lodo se analizaron en el laboratorio de la planta. Se tomaron cinco muestras de cada uno de estos materiales y se sacó un promedio aritmético, cuadro 29.

Cuadro 29. Caracterización fisicoquímica del lodo residual y acondicionadores

Parámetro	1	2	3	4	5
Densidad aparente gr/ml (base hum.)	0.95	0.0714	0.122	0.160	0.07
Densidad real gr/ml (base húmeda)	1.26	1.72	1.9	-	-
Porosidad %	24.7	95.8	93.7	-	-
Sólidos totales %	22.1	94.7	95.8	93.0	25.0
Sólidos volátiles %	64.3	80.8	71.1	98.0	95.0
Sólidos fijos %	37.7	19.2	28.9	2.0	5.0
Humedad %	77.9	5.3	4.2	7.0	75.0
Nitrógeno total %	5.74	1.7	-	-	-
Materia orgánica %	72.5	-	-	-	-
Carbono orgánico %	36.25	-	-	-	-
Relación C/N	6.3/1	-	-	-	-
Demanda química de oxígeno mg/g	1 171.1	-	-	-	-
Capacidad calorífica BTU/lb	8 081.0	7 779.0	5 021.0	7 000.0	4 970.0

1 Lodo residual, 2 Bagazo de caña, 3 Cascarilla de arroz  
4 Pedacería de madera, 5 Médula de caña.

El porcentaje de humedad de los lodos es de 78% y un 22% de sólidos totales, adecuado para el proceso. El bagazo de caña analizado presentó un valor de sólidos del 94.7%, un contenido de humedad del 5.3% y una porosidad de 95.8%.

La cascarilla de arroz tuvo un alto contenido de sólidos totales 95.8%, un bajo contenido de humedad 4.2%, y un porcentaje de porosidad de 93.7%. La pedacería de madera 93% de sólidos totales. La médula de caña 25%. Estos valores hacen posible el uso de estos materiales como acondicionadores.

Los porcentajes de humedad varían con las condiciones ambientales. En este caso el contenido de humedad se redujo a 5.3% para el bagazo de caña y 4.2% para la cascarilla de arroz, debido a la exposición de los materiales al sol.

La capacidad calorífica de cada uno de los componentes se determinó en forma indirecta utilizando el método propuesto por Zanoni, 1982, obteniéndose los siguientes valores:

- Lodo 8,081.74 BTU/lb.
- Bagazo de caña 7,779.55 BTU/lb.
- Cascarilla de arroz 5,021.97 BTU/lb.
- Pedacería de madera 7,000 BTU/lb.
- Médula de caña 4,970 BTU/lb.

Estos valores corresponden a materiales con una alta capacidad calorífica, que garantiza una cantidad adecuada de energía para el proceso.

Con los valores obtenidos de los análisis de laboratorio se realizó el balance de masas y energía para cada una de las pilas. Los cálculos para este balance se encuentran en el Anexo 1.

### 5.3 Descripción del equipo utilizado

#### 5.3.1 Equipo de ventilación

El ventilador utilizado en los experimentos fue de tipo centrífugo y de un caballo de fuerza.

#### 5.3.2 Registro y control de temperaturas

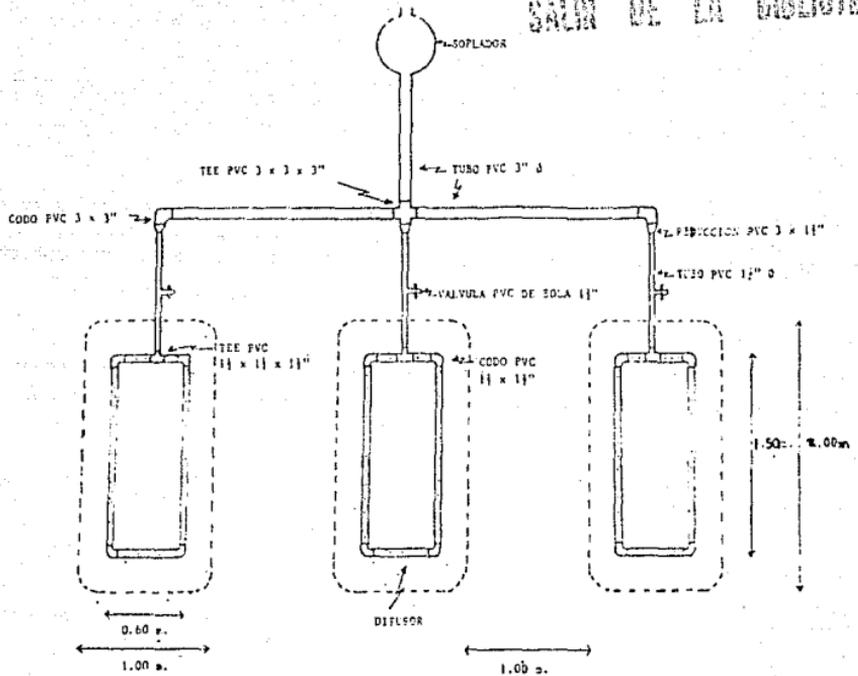
El equipo de medición de temperatura consistió de una serie de termopares tipo J con extensión. Los que se conectaban a un teletermómetro con 3 escalas, de 0 a 100°C, marca Yellow Springs, modelo 42, para propósito general. Para el control de las temperaturas se usó un medidor de tiempo donde se programaron los ciclos de ventilación.

### 5.4 Selección de acondicionadores

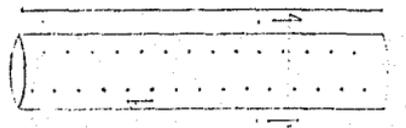
Con el fin de probar el sistema de aeración y seleccionar el acondicionador, se hizo el montaje de pilas, el 12 de mayo, Experimento 1 y 26 de julio de 1989, Experimento 2.

El sistema de aeración consistió de un difusor de 1 1/2" de diámetro fabricado en PVC con orificios de 1/4" de diámetro, lámina 18.

El difusor se conectó al ventilador. Sobre cada modulo se instaló una cama de bagazo de caña de 10 cm de espesor. Una vez mezclados los materiales se colocaron encima, para formar las pilas de 1 m de ancho, 2 m de largo y 60 cm de altura.



DETALLE DE LAS PERFORACIONES



LOCATE A-A

Lámina 18. Diagrama del difusor de pilas experimentales

Finalmente se colocó una cubierta de bagazo de caña, de 5 cm de espesor.

El control de olor dentro del proceso se realizó a través del montaje de una pila de 0.4 m<sup>3</sup>, hecha de bagazo de caña y arena, la cual recibió el aire extraído de las pilas.

#### 5.4.1 Características de las mezclas

Las características de las mezclas de lodo-acondicionador utilizadas para cada experimento se describen en los cuadros 30 y 31. En estos cuadros se menciona la cantidad de cada uno de los materiales, su relación en peso, humedad y sólidos iniciales.

En el cuadro 31 se observa que las pilas dos y tres tienen una cantidad de sólidos cercano al recomendado en la literatura, 45 y 41% respectivamente. La pila 1, no cumple estas recomendaciones ya que tiene bajo contenido de sólidos (28%). Sin embargo, se probó esta mezcla porque se observó que la capacidad de adsorción del bagazo es suficiente para recibir mayor volumen de lodo.

En el Experimento 2, cuadro 31, se usó una mezcla lodo-bagazo de caña igual a la del Experimento 1, ya que se obtuvo buena reducción de humedad y altas temperaturas. Se probaron nuevos acondicionadores como, composta reciclada y pedacera de madera, con sólidos totales de 43 y 36% respectivamente. No se utilizó cascarilla de arroz ya que en el Experimento 1 no se obtuvieron los resultados esperados.

#### 5.5 Planta Piloto

Para la planta piloto se acondicionó una superficie pavimentada de 70 m<sup>2</sup>, la cual se techó con lámina de asbesto. En la lámina 19, se observa la vista en planta del sistema que tiene capacidad de tratar de 10 a 15 toneladas de lodo.

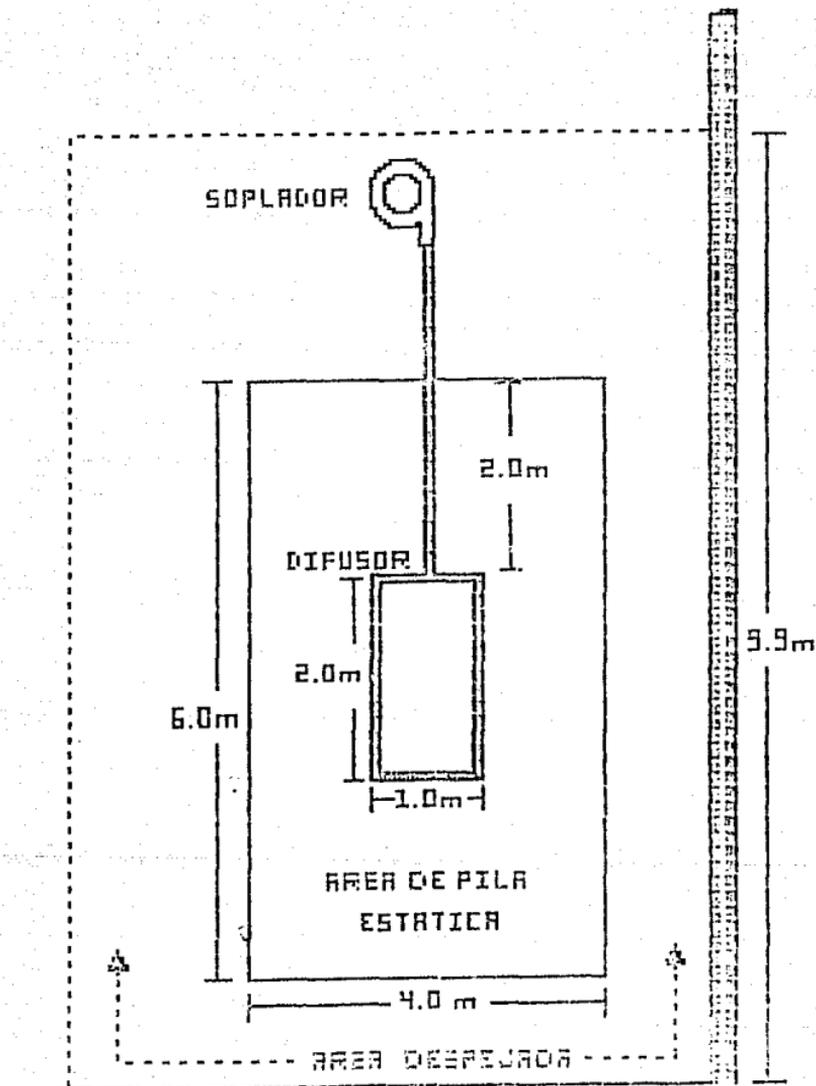


Lámina 19. Diagrama de la planta piloto de composteo

Cuadro 30. Características de las mezclas, Experimento 1

Parámetros	Pila 1	Pila 2	Pila 3
Lodo (kg)	250	125	125
Material acondicionador (kg)	50	50	50
Relación volumetrica	5:1	2.5:1	2.5:1
% Sólidos totales	28	45	41
% Humedad	72	55	59
% Sólidos volátiles	71	80	65

Pila 1 y 2 (lodo-bagazo de caña), Pila 3 (lodo-cascarilla de arroz)

Cuadro 31. Características de las mezclas, Experimento 2

Parámetros	Pila 1	Pila 2	Pila 3
	Lodo-bagazo de caña	Lodo-reciclo	Lodo-madera
Lodo (kg)	256	96	160
Acondicionador (kg)	40	40	75
Relación en peso	6.4:1	2.4:1	2.13:1
% Sólidos totales	29	43	36
% Humedad	71	57	64
% Sólidos volátiles	82	80	85
% Porosidad	89	88	77
Relación C/N	12	12	20
pH	7.2	7.3	7.4

Para el Experimento 3, del 10 de octubre de 1989, se utilizó médula de caña como acondicionador.

En el cuadro 32 se observan las características de la mezcla, concentración de sólidos totales de 20.5% y porosidad de 25%. Lo que provocó que el producto no se estabilizara en 21 días, la baja porosidad impide el movimiento del aire a través de la pila y el exceso de humedad disminuye la velocidad del proceso.

Esta pila se acondicionó agregándole bagazo de caña hasta alcanzar una concentración de sólidos totales del 35%.

Cuadro 32. Características de la mezcla, Experimento 3

Parámetros	Mezcla lodo-médula de caña
Lodo en kg	4,000
Acondicionador en kg	600
Relación en peso	6.6:1
% Sólidos totales	20.5
% Humedad	79.5
% Sólidos volátiles	72.3
% Porosidad	25.0
Relación carbono/nitrógeno	4:1
pH	6.5

### 5.6 Operación y monitoreo del sistema

Las pilas se montaron por un periodo de 21 días en su etapa termofílica. Al inicio se inyectó aire a las pilas durante cuatro días, en ciclos de aeración de 15 minutos cada dos horas, durante doce horas diarias. En el quinto día se invirtió la ventilación para llevar a cabo el control de olor.

Se mantuvo la extracción del aire de las pilas durante cinco días. Del décimo día al 21 se volvió a inyectar aire al sistema. Se tomó diario las temperaturas, aproximadamente a las 10:00 A.M., en los puntos marcados en la lámina 20.

La cantidad de oxígeno aplicada al sistema, sólo fue medida en forma esporádica debido a fallas en el sistema de ventilación.

Se tomaron muestras en el centro y extremo de la pila para determinar porcentaje de humedad y remoción de sólidos volátiles.

Se determinó la concentración de coliformes totales, fecales, *Enterococos*, *Salmonella* y *Shigella* al inicio y final del proceso, y en el Experimento 3 cada semana.

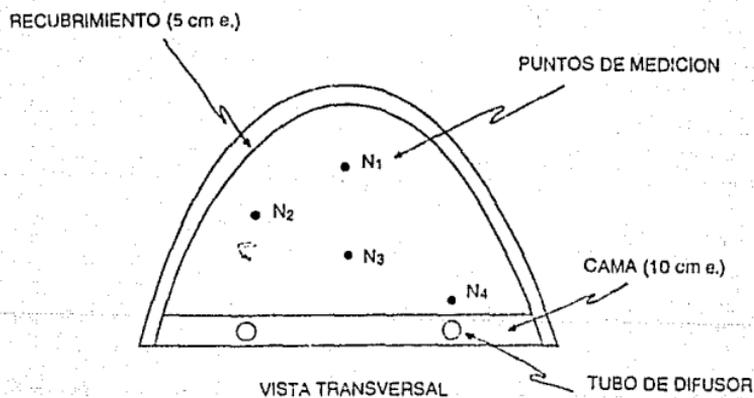
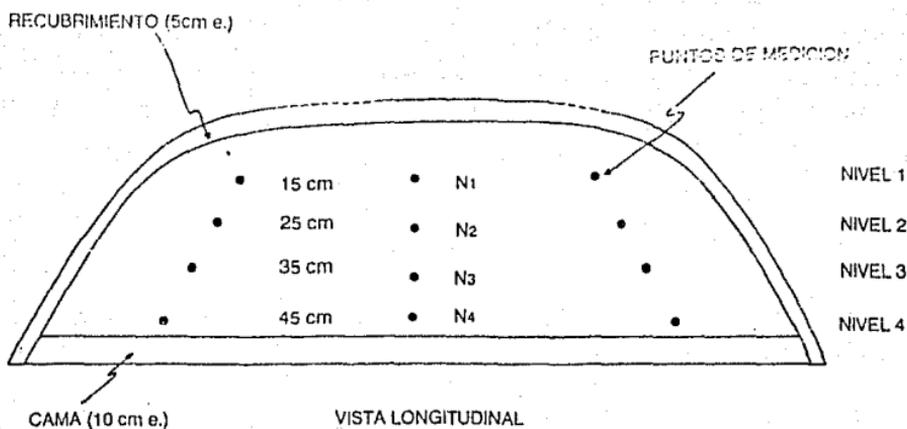


Lámina 20. Puntos de medición de temperatura en las pilas experimentales.

## 5.7 Análisis e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos del monitoreo del proceso y de los análisis físico-químicos y bacteriológicos realizados al lodo y compostas, se describen a continuación.

### 5.7.1 Distribución de temperaturas

La distribución de la temperatura dentro de las pilas de composteo, está relacionada con el tiempo. Se incrementó la temperatura durante los primeros días, para luego disminuir en forma gradual.

En los dos primeros experimentos realizados se observó una distribución de temperaturas más o menos constante. Un ascenso brusco en los primeros días del proceso, hasta alcanzar temperaturas entre 55 y 65°C por más de 5 días consecutivos. Una etapa de descenso paulatina, hasta llegar a temperaturas entre 30-45°C al final de los 21 días de composteo.

Los mejores resultados se consiguieron con bagazo de caña, seguido por el reciclo. Con la pedacería de madera no se alcanzaron altas temperaturas, ya que los pedazos fueron demasiado grandes. En la lámina 21 se observan las temperaturas promedio de tres pilas de composteo obtenidas en el Experimento 1, 26 de julio de 1989.

La temperatura en las pilas disminuyó de arriba hacia abajo, formando estas zonas: de alta temperatura región superior, de temperatura media a la mitad y fría en los puntos inferiores, lámina 22.

### 5.7.2 Remoción de microorganismos patógenos

La remoción de microorganismos patógenos, se evaluó en los Experimentos 2 y 3, en ambos casos se encontró una correlación entre la temperatura y la inactivación de microorganismos.

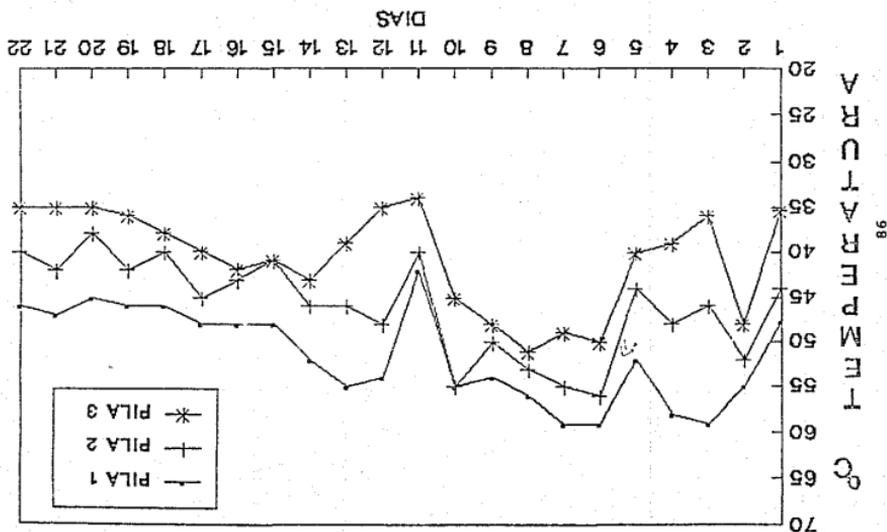
En el Experimento 2 pila 1, se alcanzó una remoción de coliformes fecales de 100% y de enterococos totales de 78%, con temperaturas entre 55 y 65°C.

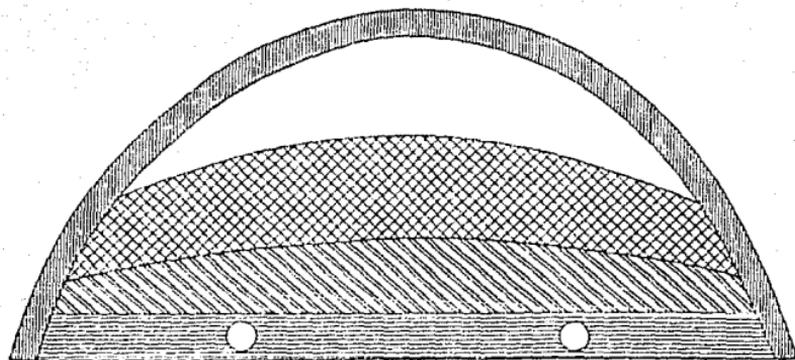
Para la composta con reciclo se obtuvieron remociones del 90% de coliformes fecales y un 80% de enterococos respectivamente, con temperaturas entre 50-55°C.

La pila que utilizó madera como acondicionador, no tuvo remoción de microorganismos patógenos, porque no alcanzó las temperaturas adecuadas para este fin. Los resultados del porcentaje de remoción de microorganismos en relación a las temperaturas para los dos experimentos se muestran en las láminas 23 y 24.

Lamina 21. Temperaturas promedio, Experimento 1

6:1 PILA 1:LODO:BAGAZO (PROPOR. EN PESO)  
2.6:1 PILA 2:LODO:BAGAZO  
2.6:1 PILA 3:LODO:CAJG:ARROZ



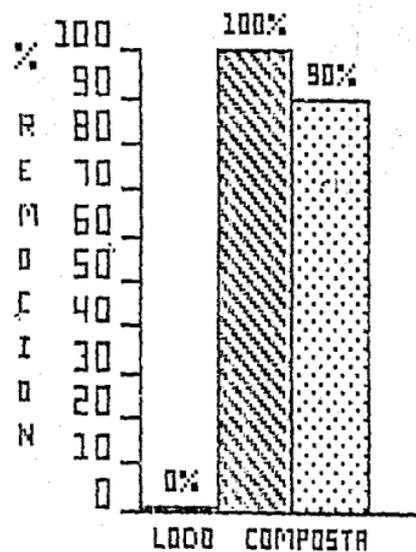


TUBO DIFUSOR DEL AIRE

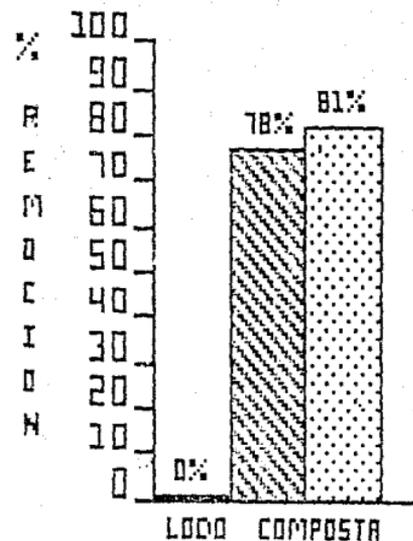
-  CUBIERTA
-  ZONA DE TEMPERATURA ALTA 45-64°C
-  ZONA DE TEMPERATURA MEDIA 40-60°C
-  ZONA DE TEMPERATURA BAJA 35-58°C
-  CAMA.

Lámina 22. Perfil de temperaturas dentro de la pila de composteo

## COLIFORMES FECALES



## ENTEROCOCCOS



 MEZCLA LODO-BRAGAZO DE CAÑA

 MEZCLA LODO-COMPOSTA RECICLADA

En el Experimento 3, lámina 24, la remoción de microorganismos también estuvo relacionada con el tiempo. A los siete días de composteo con temperaturas de 53°C, se obtuvo una reducción de 100% de enterococos, 50% de microorganismos mesofílicos aerobios y 20% de coliformes fecales. A los 14 días y manteniéndose en la pila temperaturas entre 50 y 54°C, se removió el 100% de los coliformes fecales.

En los análisis realizados a las muestras, sólo se encontró una con 9.0 NMP/g de *Salmonella*, la cual fue eliminada a los 7 días del proceso. *Shigella* no se encontró en las muestras analizadas.

### 5.7.3 Remoción de humedad y sólidos volátiles

Durante el proceso de composteo se redujeron los sólidos volátiles de 18.9% para el bagazo de caña, 4.8% para el recicló y 5.4% para la pedacería de madera.

La pila 3 del Experimento 1, que contenía pedacería de madera, obtuvo un aumento en la concentración de sólidos volátiles de un 10%. Esto debido al recrecimiento de patógenos, ya que la pila tenía temperaturas muy bajas, 30°C al final del proceso, lámina 25.

En los tres experimentos hubo disminución de humedad, con promedio del 60% al final del proceso, lámina 26. Este valor es conveniente, porque durante el proceso de curado, la humedad se reduce un 20% más.

Una reducción de humedad muy alta no es aconsejable, debido a que la generación de polvos dificulta el manejo del producto.

En la lámina 27 se observa la correlación de estas tres variables para la mezcla lodo-bagazo de caña. Se obtuvo mayor remoción de sólidos volátiles y humedad, cuando se alcanzaron altas temperaturas.

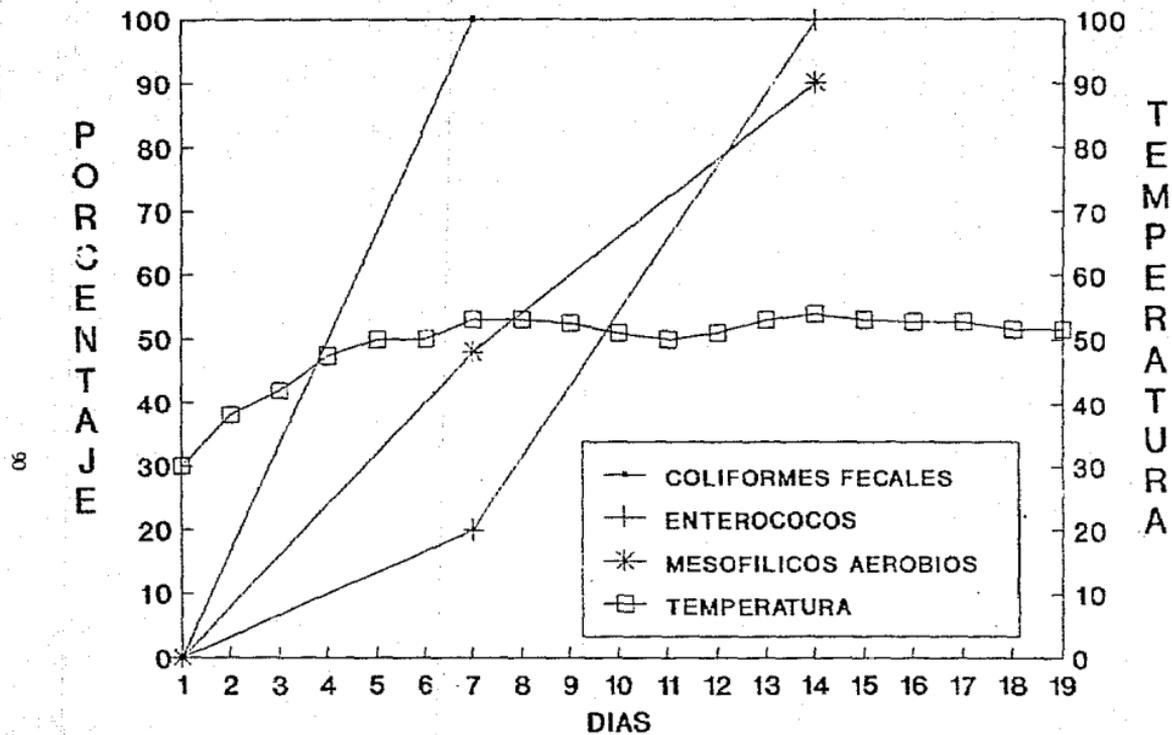
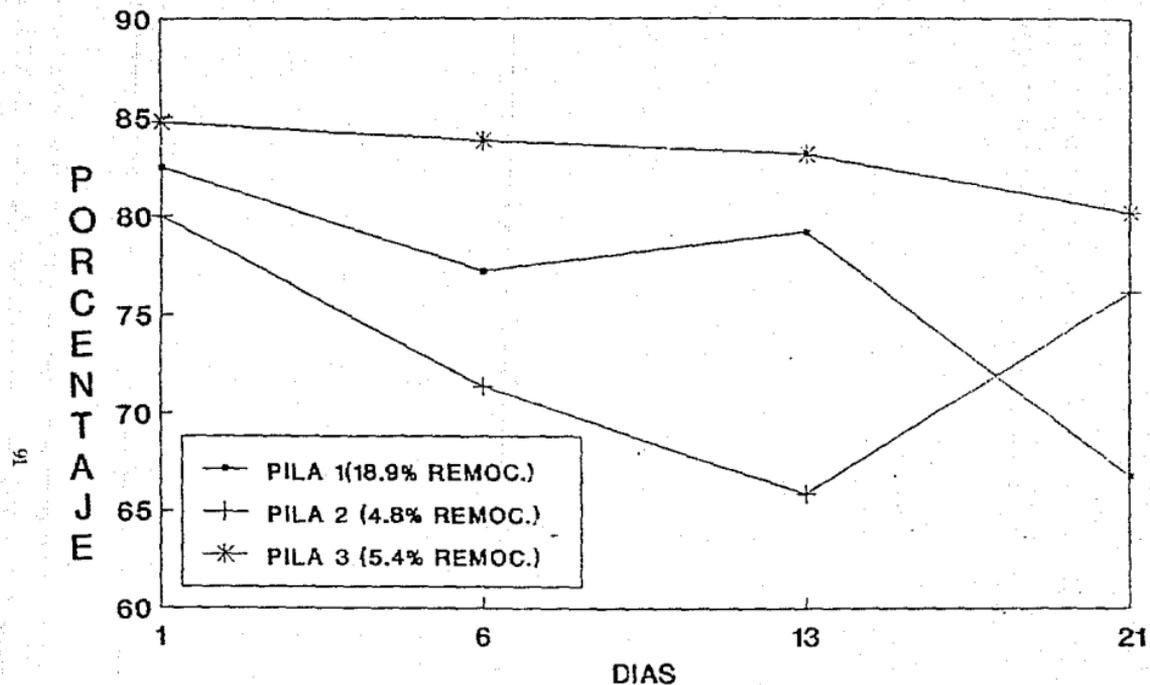


Lámina 24. Remoción de microorganismos, Experimento 3

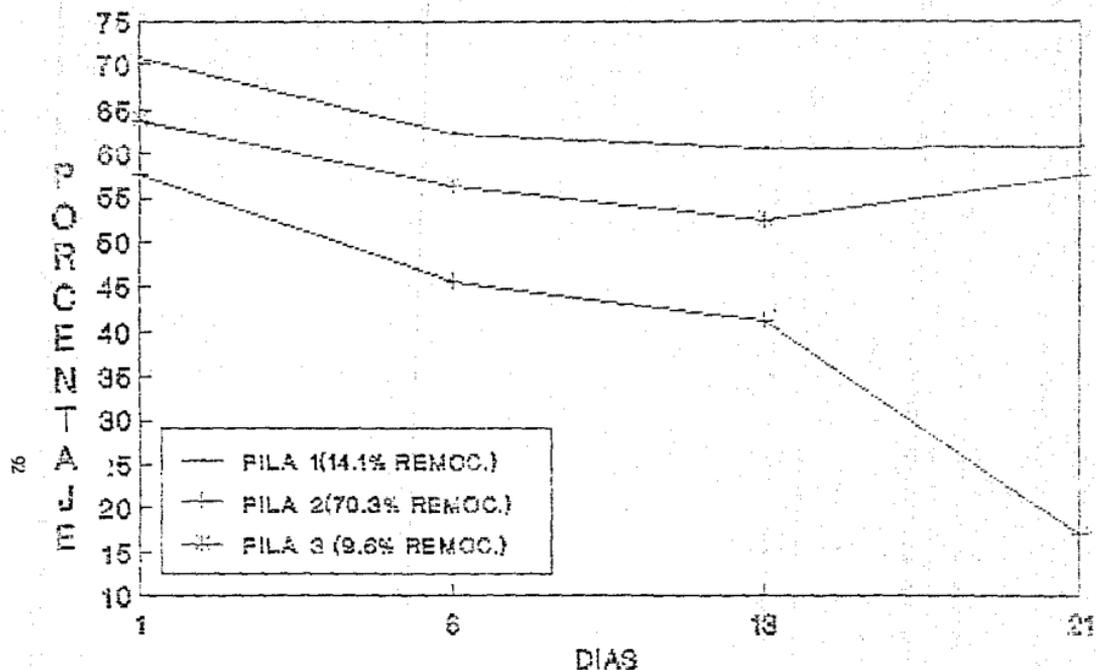


PILA 1, LODO: BAGAJO 6.4:1 (PROPOR. EN PESO)

PILA 2, LODO: B. RECICLO 2.4:1

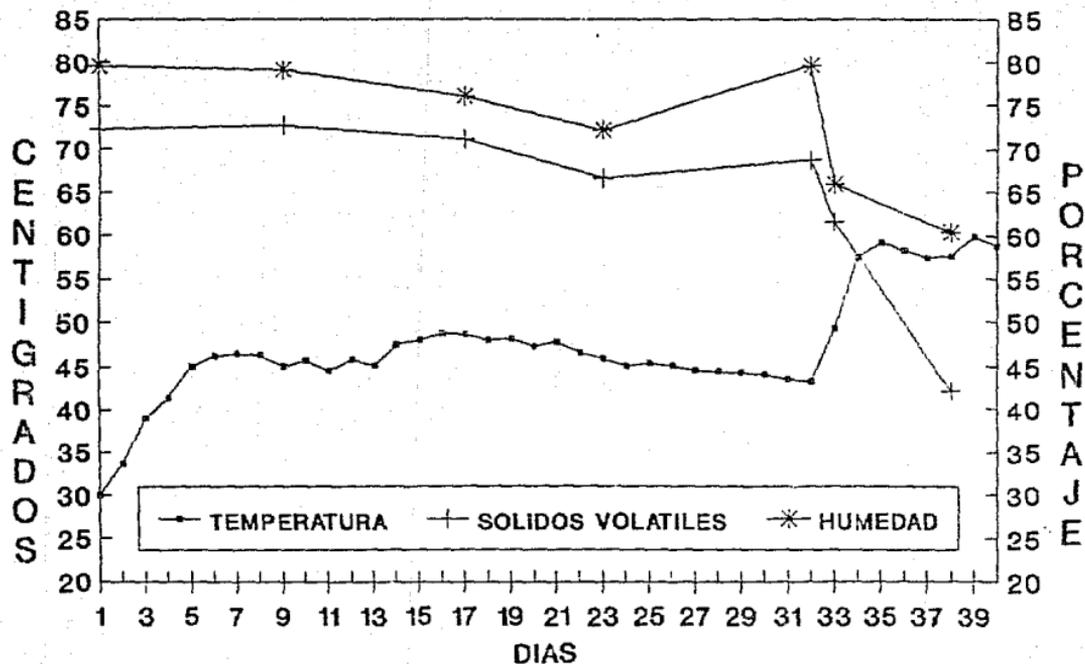
PILA 3, LODO: P. MADERA 2.13:1

Lámina 25. Porcentaje de sólidos volátiles en la pila de composteo, Experimento 2



FILA 1, LODO: BAGAZO 6.4:1 (PROPOR. EN PESO)  
 FILA 2, LODO: B. RECICLO 2.4:1  
 FILA 3, LODO: P. MADERA 2.13:1

Lámina 26. Variación de humedad en la pila de composteo, Experimento 2



LODO: MEDULA DE CAÑA 23.3:1  
(PROPOR. EN PESO)

Lámina 27. Correlación de parámetros sistema de composteo, Experimento 3

#### 5.7.4 Reducción de metales pesados

En el cuadro 33 se observan los valores de metales pesados en tres compostas, con diferentes acondicionadores y su comparación con las normas propuestas por la EPA, 1988.

El mayor porcentaje de reducción (66%) se logró con la pedacería de madera que adsorbe los metales y es cribada al final del proceso de composteo. La de menor remoción (25%), fue la composta de recicló, debido a que los metales contenidos en el lodo se suman con los que contenía el material.

Para el hierro el límite es de 78,000 ppm, porque forma compuestos estables en el suelo, tiene poca movilidad y las plantas lo absorben en pequeñas cantidades. Ninguno de los valores obtenidos rebasan las recomendaciones.

Cuadro 33. Concentración de metales pesados en lodos y compostas comparados con los valores máximos permitidos por la EPA

Metal	Lodo	Metales pesados en composta (ppm)			Norma (EPA-1988)
		Recicló	Bagazo	Pedacería de madera	
Hierro	4680	4269	3480	1518	78000
Zinc	650	686	550	289	1250-1800
Manganeso	100	105	97	49	2500
Cobre	176	124	130	35	500-900
Plomo	560	482	553	232	285-1000
Níquel	126	102	89	40	100-200
Cadmio	1	1.49	1	0.86	12.5-30

#### 5.7.5 Reducción de tóxicos orgánicos

##### 5.7.5.1. Hidrocarburos aromáticos polinucleares

Se observa que para algunos compuestos tales como el Acenafteno, Antraceno, Criseno, Pireno y Benzo (k) fluoranteno, el composteo produjo una reducción en su concentración, cuadro 34. En cambio para el Benzo (a) antraceno, Benzo (b) fluoranteno, el tratamiento resultó ser poco significativo. Por lo que respecta al Acenaftileno, su valor se elevó drásticamente en la composta.

Cuadro 34. Comparación de hidrocarburos aromáticos polinucleares en lodo y composta

Compuesto	Concentración (ppb)	
	Lodo	Composta
Naftaleno	-	-
Acenaftileno	8404	17800
Acenafteno	4772	160
Fluoreno	2264	798
Fenantreno	873	1686
Antraceno	1859	54
Fluoranteno	5441	5827
Pireno	1442	664
Benzo (a) antraceno	1554	1295
Criseno	1247	178
Benzo (b) fluo- ranteno	4217	3844
Benzo (k) fluo- ranteno	823	-
Benzo (a) pireno	-	-
Benzo (ghi) perileno	-	-
SUMA TOTAL	32896	32306

El compuesto que resulta más peligroso es el Benzo (b) fluoranteno, por su fuerte toxicidad.

En la lámina 28 se muestran en forma esquemática las concentraciones de tóxicos orgánicos presentes en muestras de lodo y composta. En la lámina 29, la carcinogenicidad relativa de los mismos.

Durante el proceso de composteo se aumentó la concentración de algunos compuestos, lo que podría explicarse por la adición de bagazo de caña. Sin embargo, estos análisis no son concluyentes, sería conveniente hacer un estudio más detallado de la presencia de tóxicos orgánicos en el lodo y composta.

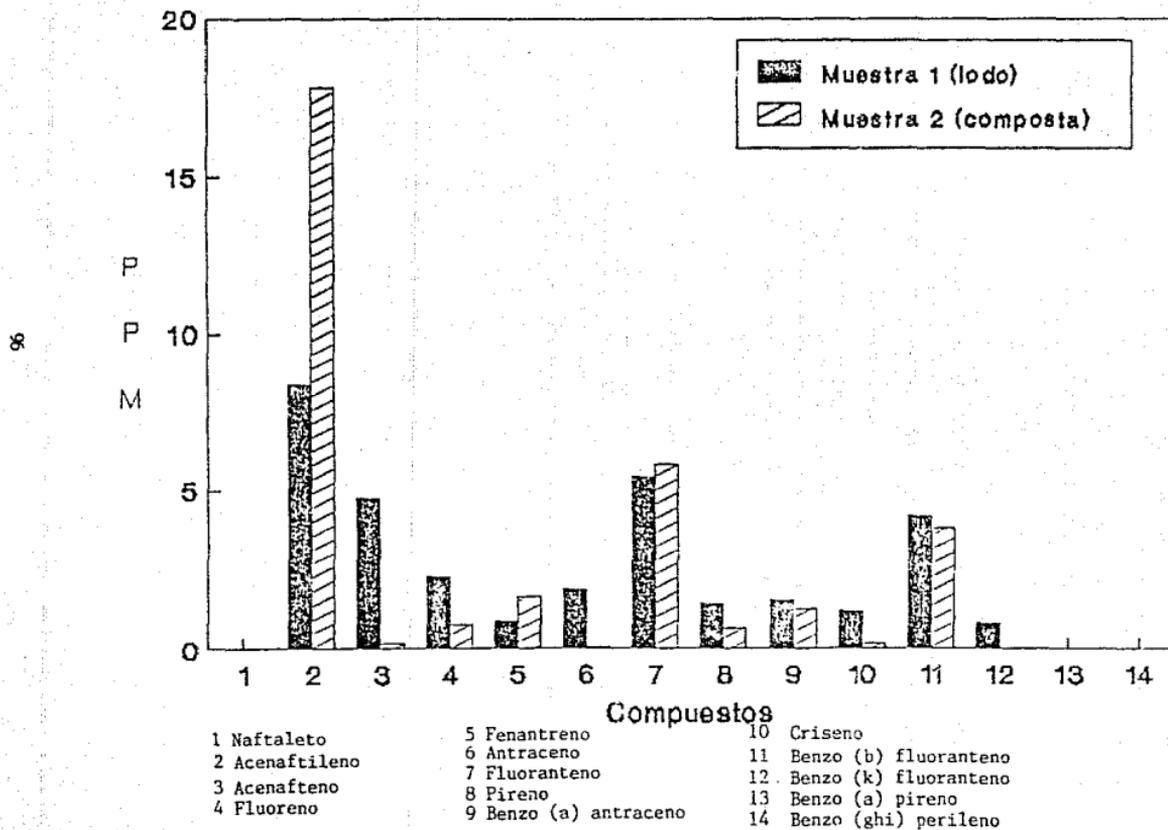


Lámina 28. Concentración de hidrocarburos aromáticos, en lodo y composta

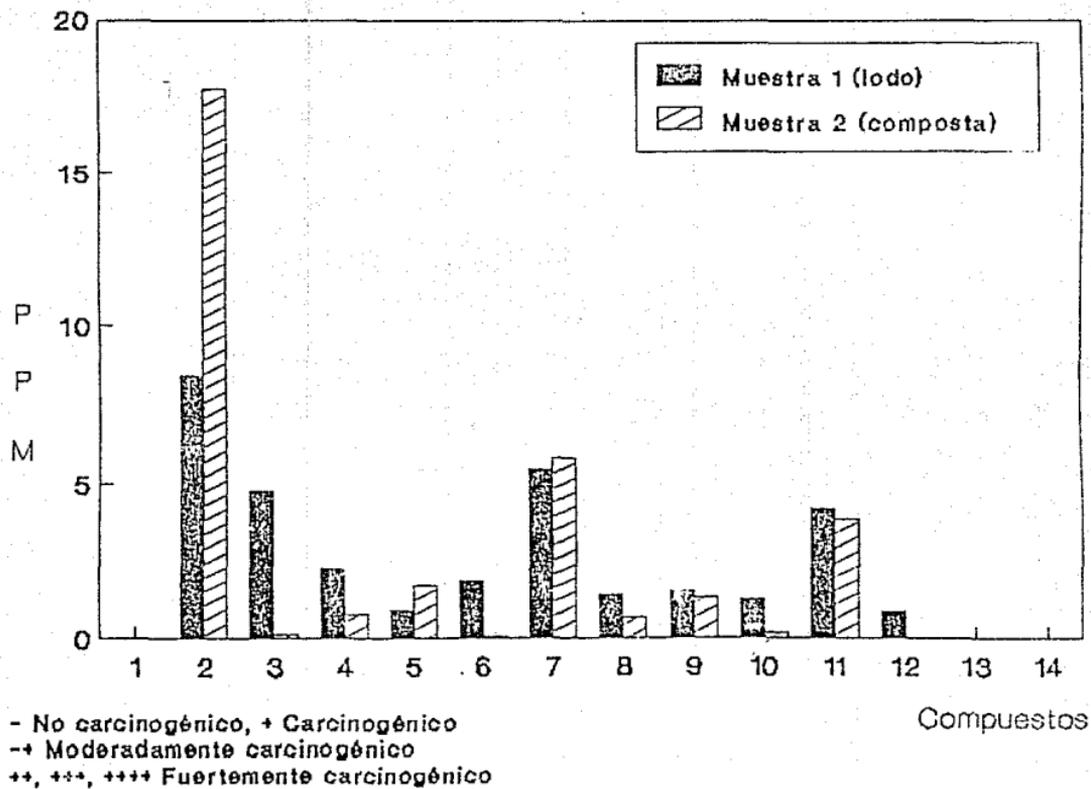


Lámina 29. Carcinogenicidad de hidrocarburos aromáticos, en lodos y composta

### 5.7.5.2 Plaguicidas organoclorados

La composta analizada fue la correspondiente a la pila 1 del Experimento 2, que utilizó bagazo de caña como acondicionador.

En el cuadro 35, las concentraciones de Aldrin, PP-DDE, Heptacloro y Heptacloro epóxido son altas, con valores de 8.62, 1.044, 1.02 y 1.01 ppm respectivamente, el Aldrin presentó concentraciones más elevadas. Esto se debe al uso de plaguicidas en el cultivo de la caña.

Los valores más bajos corresponden al Endrin Aldehído, Beta BHC y PP-DDD, con valores de 0.016, 0.014 y 0.01 ppm respectivamente.

Cuadro 35. Comparación de plaguicidas organoclorados en lodo y composta

Compuesto	Compuesto (ppm)	
	Lodo	Composta
Alfa BHC	0.20	0.08
Gama BHC	2.55	0.77
Beta BHC	3.23	0.01
Heptacloro	0.21	1.02
Aldrin	0.07	8.62
Heptacloro epóxido	0.03	1.01
Endosulfan I	0.36	0.27
p-p'DDE	0.12	1.04
Dieldrin	0.12	0.04
Endrin	0.02	0.20
p-p'DDD	0.04	0.01
Endosulfan II	1.92	0.35
p-p'DDT	0.10	0.07
Endrin aldehído	0.76	0.01
Endosulfan sulfato	3.58	0.61
TOTAL	13.36	14.16

Si comparamos la muestra de lodo y la de composta, lámina 30, se observa que los valores presentaron grandes variaciones debido a la presencia de tóxicos en el bagazo de caña.

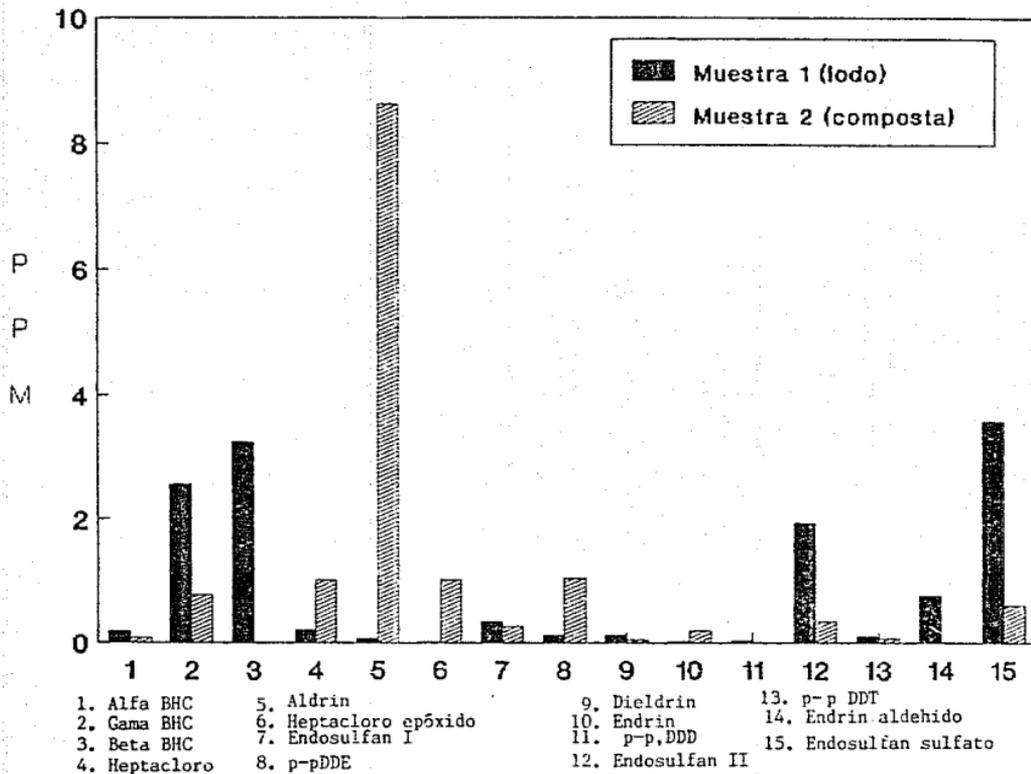


Lámina 30. Concentración de plaguicidas organoclorados, en lodo y composta

Las concentraciones totales de plaguicidas en la muestra de lodo y composta no presentaron grandes variaciones, con valores de 13.36 ppm en el lodo y 14.16 ppm en la composta. Estos valores se consideran relativamente altos para cultivos agrícolas que son directamente consumidos por animales o por humanos. Por lo tanto la composta sólo se recomienda para el cultivo de plantas de ornato.

### 5.8 Concentración de nutrimentos en la composta

La evaluación se hizo con base a los datos analíticos del lodo y composta del experimento 2. Cuadro 36(a) y 36(b).

Uno de los propósitos del composteo es obtener un producto con propiedades semejantes a un abono orgánico comercial y con un grado de estabilización parecido a un humus. En el cuadro 37, se muestra el contenido de nutrientes en diferentes abonos orgánicos y composta. Los abonos orgánicos son pobres en macronutrientes, sin embargo son ricos en compuestos carbonados.

#### 5.8.1 Estabilidad de la composta

Un índice que sirve para determinar la estabilidad de la composta de lodo residual lo constituye la relación C/N. Hirai et al. 1988, proponen una relación C/N de 5 a 6 como indicador de madurez de la composta. Los valores obtenidos para las compostas (4.17, 4.8 y 5.75) indican que éstas, alcanzaron la estabilidad requerida.

#### 5.8.2 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH del lodo es de 7.3, o sea ligeramente alcalino, durante el composteo, su valor disminuye de 6.2 a 6.6, de ligeramente ácido a casi neutro. Con estos valores de pH, la disponibilidad de todos los elementos nutritivos que las plantas toman del sustrato se encuentran en niveles adecuados.

Cuadro 36(a). Cambios químicos del lodo en el proceso de composteo, experimento 2

Parámetros	Lodo residual	Composta de lodo		
		bagazo/	reciclo/	ma- dadera
Potencial de hidrógeno	7.3	6.2	6.6	6.3
Conductividad eléctrica mmhos/cm	6.9	6.3	6.3	3.9
Sulfatos $SO_4^{2-}$ meq/l	0.06	0.048	0.051	0.028
Carbonatos $CO_3$ meq/l	0	0	0	0
Bicarbonatos $HCO_3$ meq/l	35.6	11.0	14.5	9.4
Cloruros $Cl^-$ meq/l	16.1	18.6	19.6	13.5
Boratos $BO_3$ meq/l	0.08	0.08	0.08	0.08
Capacidad de intercambio catiónico CIC meq/100 g	45.07	66.2	69.0	42.6
Carbonatos $Ca^{++}$ meq/100 g	33.61	62.7	63.50	27.55
Magnesio $Mg^{++}$ meq/100 g	1.47	2.19	11.09	11.09
Potasio $K^+$ meq/100 g	0.84	9.25	6.90	1.82
Sodio $Na^+$ meq/100 g	0.76	3.05	2.8	0.80
Carbono %	25.84	20.85	20.65	24.15
Materia orgánica %	44.39	41.7	41.3	48.3
Nitrógeno total %	2.11	5.0	4.3	4.2
Ión amonio $NH_4^+$ ppm	416	7,380	5,708	5,110
Nitrato $NO_3$ ppm	3	495	0	249
Nitritos $NO_2$ ppm	6	949	849	415
Fósforo total ppm	47 900	9 423	8 937	3 983
Fósforo orgánico ppm	25 587	1 798	1 554	1 117
Fósforo disponible ppm	419	1 105	1 058	586

Cuadro 36(b). Cambios químicos del lodo en el proceso de composteo, experimento 2

Parámetros	Lodo residual	Composta de lodo bagazo reciclado/ madera		
		bagazo	reciclo/	madera
Fierro ppm	5 442	3 484	4 269	1 518
Cinc ppm	1 040	547	686	289
Manganeso ppm	139	97	105	49
Cobre ppm	177	129	124	35
Plomo ppm	752	553	482	232
Níquel ppm	108	89	102	40
Cobalto ppm	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo ppm	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cadmio ppm	2.0	1.29	1.49	0.86

Cuadro 37. Comparación del contenido de nutrimentos en abonos comunes con la composta del lodo residual

Elementos nutricionales	Abono de:				
	Vacuno	Gallinaza	Porcino	Ovino	Composta
pH	8.7	7.6	7.2	9.0	6.3
% Materia orgánica	48.24	29.43	46.90	48.24	48.3
% Nitrógeno	2.10	5.10	3.10	2.30	5.0
% Fósforo	0.58	2.06	0.64	0.72	0.94
% Potasio	3.10	2.20	1.83	4.36	0.36
% Calcio	3.39	20.13	1.68	2.91	1.26
% Magnesio	0.97	0.88	0.93	0.57	0.14

Moreno Muñoz A., 1982.

### 5.8.3 Materia orgánica (% M.O.)

Tanto el lodo, como las tres compostas tienen cantidades elevadas de materia orgánica, 73, 41.7, 41.3 y 48.3%, respectivamente. Hay una tendencia a disminuir el porcentaje de materia orgánica durante el composteo, debido al proceso de mineralización y al consumo de carbono, llevado a cabo por los microorganismos.

### 5.8.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico de las compostas 66.2, 69.0 y 42.6 meq/100 g, nos da una idea de la capacidad nutricional proporcionada, al mezclar la composta, con el suelo.

### 5.8.5 Nutrientes principales

En el cuadro 38 se aprecia el contenido de nutrientes principales en tres compostas de lodo preparadas con diferentes materiales acondicionadores.

Cuadro 38. Composición orgánica y contenido de macronutrientes en tres compostas de lodo

NUTRIENTOS	COMPOSTAS DE LODO		
	Bagazo de caña	Material de re- ciclo	Pedacería de madera
Materia orgánica %	41.7	41.3	48.3
Carbono %	20.85	20.65	24.15
Relación carbono/nitrógeno	4.17	4.8	5.75
Nitrógeno %	5.0	4.3	4.2
Fósforo %	0.94	0.89	0.40
Potasio %	0.36	0.26	0.07
Calcio %	1.25	1.27	0.55
Magnesio %	0.03	0.13	0.13

Los nutrimentos evaluados fueron:

-Magnesio ( $Mg^{++}$ )

El magnesio está disponible para la planta como ion  $Mg^{++}$ . Al igual que el calcio, su disponibilidad depende de la concentración de otros elementos.

Si el K o el Ca se encuentran en mayor cantidad, las plantas tendrán deficiencias de Mg. En la solución del suelo se encuentra en cantidades que van de 1-100 ppm. En el lodo se encontró en un rango de 1.47-2.3 meq/100 g, en las compostas su valor aumentó de 2.19-11.09 meq/100 g, valores que no representan problemas debido al equilibrio que se establece con la presencia de otros cationes.

-Potasio ( $K^+$ )

Dentro de los tres principales macronutrimentos, se encuentra el K. El potasio no se encuentra en gran cantidad en la solución del suelo. Bidwell, (1979) menciona un rango de 1-50 ppm, debido a que tiende a fijarse en los minerales del suelo.

Al igual que el Ca y Mg está en competencia en el complejo de intercambio, cualquier variación en la concentración de alguno, aumentará o disminuirá su disponibilidad. También de la misma forma que en los anteriores cationes su concentración, aumentó de 0.84-5.25 en el lodo, a 1.82-9.25 meq/100 g en las compostas.

-Nitrógeno

Las formas de nitrógeno analizadas en lodos y compostas son: el nitrógeno total (%N), amoniacal ( $NH_4$ ), nitratos ( $NO_3$ ) y nitritos ( $NO_2$ ).

Los resultados muestran que en el lodo se tiene un valor de 2.11, que se incrementó en las tres compostas (4.2-5.0%) por la adición de bagazo de caña, composta reciclada y pedacería de madera.

Comparando estos valores con abonos orgánicos, resultan más elevados, lo que nos da una idea del contenido de este nutriente en las compostas, cuadro 34.

Los contenidos de nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos también se incrementaron, debido a la adición de acondicionadores.

En el composteo los niveles de nitrógeno amoniacal disminuyen, acompañados de un incremento en la cantidad de nitratos, que indica que la nitrificación se llevó a cabo, Bishop P. and Godfrey C., 19. Si la aeración no ha sido suficiente o la fuente de amoniacal es elevada, la nitrificación no se lleva a cabo, ya que ésta ocurre como consecuencia de un proceso aerobio.

La acumulación de nitritos se disminuye cuando los niveles de amoniaco descienden debido a su oxidación, y/o a la disminución del pH durante la nitrificación. Los microorganismos que oxidan el nitrito se desarrollan asimilando su sustrato.

En las tres pilas del Experimento 2, se observó alta concentración de nitrógeno amoniacal y nitritos con valores más bajos de nitratos, lo cual indica que no hubo nitrificación adecuada.

Altas dosis de compostas con nitrógeno amoniacal pueden causar daño en la germinación de semillas. Se debe, por lo tanto, permitir su estabilización con el suelo durante 7 u 8 días antes de la siembra.

Cuando se usa composta como sustrato de vivero, se deben preparar las mezclas unos días antes, para permitir su estabilización o la mineralización adecuada del nitrógeno.

Los nitritos  $\text{NO}_2$ , son tóxicos a las plantas y microorganismos, representan un problema cuando se acumulan como resultado de la alcalinidad y elevados niveles de amonio. Sin embargo se oxidan con facilidad en nitratos en presencia de oxígeno, por lo cual las concentraciones elevadas no son frecuentes una vez aplicados en suelo.

La recomendación hecha respecto a nitrógeno amoniacal, puede ser aplicada también, para contrarrestar la toxicidad de los nitritos.

Por otra parte el nitrato también puede ser contaminante cuando se aplica en cantidades excesivas de como es requerido por las plantas, ya que el exceso es lixiviado al acuífero.

#### -Fósforo

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Ortiz, 1977 dice que la cantidad de fósforo en la capa arable varía de 8 000 a 2 500 Kg/ha. El fósforo es mayor en el suelo superficial, debido a su escaso movimiento, que por su afinidad química con algunas sustancias, forma compuestos insolubles.

En condiciones de cultivo, el fósforo disponible es removido cada año y debe ser restituido como fertilizante.

El fósforo es adecuado sólo en 1 ppm, para el crecimiento de las plantas, Bidwell 1979.

Las formas de fósforo asimilables por las plantas son:  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y en pequeñas cantidades como ion ortofosfato secundario  $\text{HPO}_4^{2-}$ , en suelos alcalinos. Otras formas de fósforo son utilizadas, pero en cantidades más pequeñas que los ortofosfatos, Potash and Phosphate Institute, 1979.

Las formas en que fue identificado el fósforo tanto en lodo, como en compostas, son el fósforo total, fósforo orgánico y fósforo disponible.

El fósforo orgánico comprende los siguientes compuestos orgánicos: fosfolípidos, ácidos nucleicos, fitina y fosfatos de inositol.

En lodo y composta la mayor cantidad de fósforo fue el total, seguido del orgánico y disponible, lo que indica su disponibilidad para formar compuestos no solubles.

Hay una tendencia, durante el composteo, a la disminución en su concentración debido a temperaturas elevadas, el rango termofílico es más favorable que el mesofílico. A excepción del fósforo disponible, que se vio incrementado, debido, tal vez, a que la reacción más favorable para el incremento de la liberación del fosfato es de 6.0-7.0, Bidwell 1979.

#### 5.8.6 Micronutrientes

En este grupo quedan comprendidos el Fe, Zn, Mn, Cu, Ni y Co. Durante el proceso de composteo hay una tendencia hacia la disminución en la concentración de metales pesados.

El porcentaje de dilución estuvo un rango de 25-68% y los valores obtenidos junto con las normas establecidas por la EPA, se mencionaron en el cuadro 33.

Es importante considerar los metales pesados como un aporte en la calidad nutrimental de la composta, ya que los micronutrientes, como también son conocidos, son esenciales al desarrollo de las plantas pues toman parte en funciones catalíticas.

## 6 EVALUACION DE LA COMPOSTA DE LODO RESIDUAL EN VIVERO

Desde hace tiempo se practica, en forma sistemática, la explotación de bancos de tierra para proveer de sustratos a las actividades de horticultura ornamental, como la floricultura y el viverismo. Esto ha ocasionado un empobrecimiento de los suelos forestales, principalmente de la capa superior donde se almacenan elementos requeridos por las plantas, tales como nitrógeno, fósforo y potasio.

Por otra parte, la extracción ilimitada de tierras orgánicas ha provocado como consecuencia su escasez y encarecimiento. Una solución a la demanda de sustratos es la producción de composta a partir de lodo residual.

Como se observó en el capítulo anterior fue posible elaborar una composta con alto contenido de nutrimentos y materia orgánica. En este capítulo se describe la evaluación estadística de estas características nutritivas en condiciones de vivero, considerando el crecimiento de la planta como un índice biológico.

### 6.1 Metodología

Se llevó a cabo un análisis de crecimiento por medio de la cuantificación de parámetros fisiológicos.

En este trabajo se adoptó la metodología propuesta por Maeda Martínez Celina, 1986. Se tomaron en cuenta los valores primarios que se refieren al número de hojas, ramas y brácteas florales, altura de la planta, que se anotaron con intervalos de tiempo de 15 a 30 días.

Asimismo, se tomaron datos de las plantas en cada uno de los tratamientos y se sometieron a un análisis de varianza.

Con los resultados obtenidos se realizaron gráficas de crecimiento e incremento en número de estructuras (hojas, ramas y brácteas florales) con respecto al tiempo considerado. Los materiales utilizados como sustratos fueron:

#### Para el testigo

- a) Mezcla utilizada por los viveristas que consiste en 35% de bagazo, 35 % de tierra de hoja fresca y 30% de tierra de hoja completamente humificada o digerida.

### Para los tratamientos

- b) 20 % de composta y 80 % de tierra de hoja fresca
- c) 40 % de composta y 60 % de tierra de hoja "
- d) 60 % de composta y 40 % de tierra de hoja "
- e) 80 % de composta y 20 % de tierra de hoja "
- f) 100 % de composta de lodo residual

Las mezclas se vaciaron en bolsas de polietileno negras de 3 litros de capacidad, previamente marcadas.

Se trabajó en condiciones de vivero y a cielo abierto. Se seleccionaron la aralia y el amaranto, y los parámetros que se evaluaron fueron las hojas y ramas.

En el caso de la bugambilia se evaluaron principalmente sus brácteas, que son las hojas modificadas de colores llamativos (morado, rosa, etc.) que envuelven a las flores, y constituyen el valor ornamental de la planta.

A todas las plantas se les midió su altura periódicamente y con cada una de las especies ornamentales se formaron módulos de 30 plantas.

### 6.2 Diseño experimental

El diseño utilizado para llevar a cabo la evaluación de la composta fue una distribución completamente al azar, que nos permitió trabajar en las siguientes condiciones:

- Con unidades experimentales homogéneas, es decir, cada una de las bolsas que se llenaron con las mezclas.
- Con margen de error experimental aleatorio.

#### 6.2.1 Distribución en campo

Para este diseño se evaluaron un módulo de flores y dos de follajes. Cada módulo tuvo cinco tratamientos y un testigo con cinco repeticiones. La distribución en vivero se muestra en los cuadros 39 y 40.

Cuadro 39. Distribución completamente al azar para prueba de composta de lodo residual

Tratamiento	Proporción en porcentaje composta-tierra	Repeticiones				
		I	II	III	IV	V
Testigo						
A	0-100	1	11	16	20	27
B	20-80	2	10	17	24	25
C	40-60	3	7	14	22	30
D	60-40	4	9	18	19	29
E	80-20	5	12	13	21	26
F	100-0	6	8	15	23	28

Cuadro 40. Distribución de las unidades experimentales en el vivero

A <sub>1</sub>	C <sub>7</sub>	B <sub>13</sub>	D <sub>19</sub>	B <sub>25</sub>
B <sub>2</sub>	F <sub>8</sub>	C <sub>14</sub>	A <sub>20</sub>	E <sub>26</sub>
C <sub>3</sub>	D <sub>9</sub>	F <sub>15</sub>	E <sub>21</sub>	A <sub>27</sub>
D <sub>4</sub>	B <sub>10</sub>	A <sub>16</sub>	C <sub>22</sub>	F <sub>28</sub>
E <sub>5</sub>	A <sub>11</sub>	B <sub>17</sub>	F <sub>23</sub>	D <sub>19</sub>
F <sub>6</sub>	E <sub>12</sub>	D <sub>18</sub>	B <sub>24</sub>	C <sub>30</sub>

### 6.2.2 Análisis de varianza

Para interpretar estadísticamente los datos se usó un análisis de varianza, con el propósito de aislar cualquier variación que pudiera afectar las características proporcionadas por los tratamientos. Para esto se llevó a cabo el método propuesto por Reyes Castañeda, 1978:

-Separar los grados de libertad (G.L.) para cada factor o causa de variación.

-Calcular la suma de cuadrados de las desviaciones de las observaciones con respecto a la media, para cada causa de variación.

- Calcular las varianzas o cuadrados medios para cada factor de variación.
- Probar hipótesis por medio de la prueba de F o relación de varianzas.
- Comparar las medias de los tratamientos (discriminación de variables).

En el cuadro 41 se resume la metodología de cálculo utilizada para el análisis de varianza.

Cuadro 41. Resumen del modelo de análisis de varianza para una distribución al azar

Causas de la varianza	G.L.	S.C.	Varianza o cuadrado medio	F
Tratamiento	a-1	$\sum (x_i - \bar{x})^2$	$\frac{S.C.}{G.L.} = A$	$\frac{A}{B}$
Error	a (n-1)	diferencia	$\frac{S.C.}{G.L.} = B$	
Total	an-1	$\sum (x_{ij} - \bar{x})^2$		

### 6.3 Resultados

Se llevó un registro de crecimiento con los resultados que se describen en los siguientes incisos.

#### 6.3.1 Registro de crecimiento de la amaranta

La amaranta fue trasplantada el 27 de julio de 1990 con una altura inicial aproximada de 12 a 14 cm. Cuatro meses después se estableció una diferencia de crecimiento con respecto al testigo.

El mayor incremento se observó con el tratamiento C (60% composta), con el que obtuvo 49 cm de altura, seguido de tratamiento F (100% composta) con el que alcanzó 39 cm. El menor valor se obtuvo con el tratamiento B (20% composta) con el que se observó un crecimiento final de 18 cm, lámina 31 y cuadro 42.

III

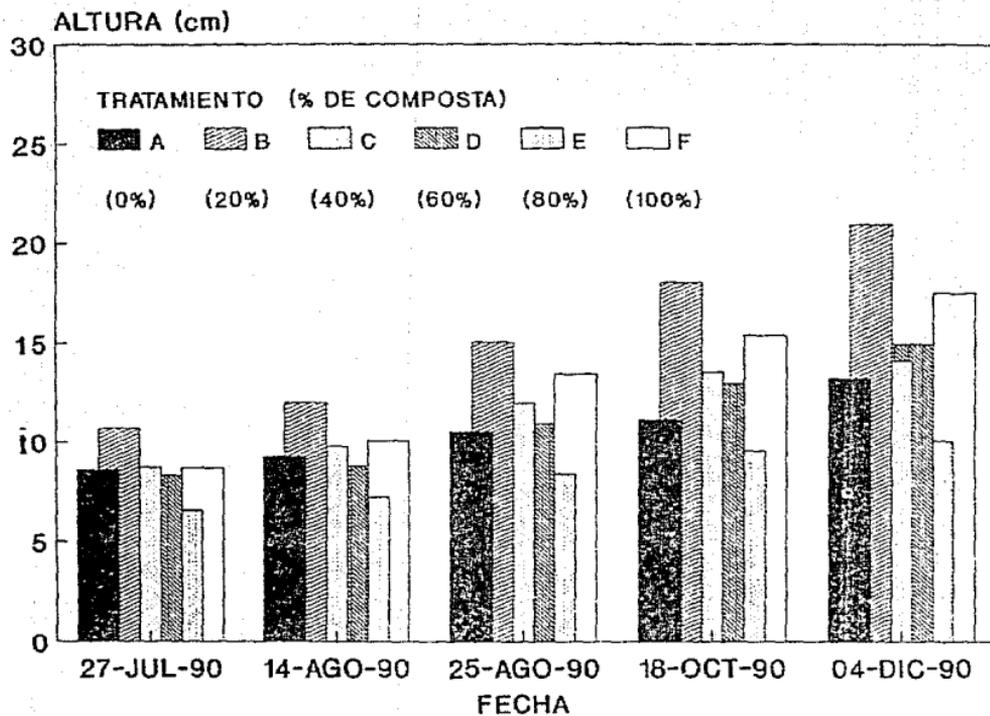


Lámina 31. Registro de altura de amaranta con sustrato de vivero y mezclas con composta

Cuadro 42. Altura alcanzada en cada tratamiento de la amaranta

Especie:	Amaranta		Parámetro:		Altura (cm)	
Fecha	T r a t a m i e n t o					
	A	B	C	D	E	F
27/07/90	11.80	12.60	11.60	13.40	11.60	11.30
10/09/90	15.40	11.40	18.60	18.80	18.40	14.40
10/10/90	26.00	23.40	35.10	30.40	20.90	32.90
04/12/90	36.90	18.10	48.80	28.00	36.00	38.90

Otro parámetro fisiológico tomado en cuenta fue el número de ramas. Los valores iniciales se registraron el 18 de octubre de 1990 con un rango de 5 a 9 ramas. Los mejores resultados se obtuvieron con los tratamientos C (60% composta), D (80% composta) y F (100% composta), valores que se correlacionaron con la altura de la planta. Los valores más bajos se obtuvieron con el tratamiento B (20% composta) 3 ramas, mientras que el testigo alcanzó 4 ramas, lámina 32 y cuadro 43.

Cuadro 43. Número de ramas desarrolladas con cada tratamiento para la amaranta

Especie:	Amaranta		Parámetro:		No. de ramas	
Fecha	T r a t a m i e n t o					
	A	B	C	D	E	F
18/10/90	4.80	6.40	7.60	9.20	5.40	4.80
04/12/90	3.80	3.20	9.20	7.80	5.20	5.60

### 6.3.2 Registro de crecimiento de la aralia

El registro de altura para la aralia reveló lo siguiente: los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento B (20% composta) y el tratamiento F (100% composta), seguidos de los tratamientos D (60% composta) y C (40% composta). Los tratamientos de valores más bajos fueron el E (80% composta) con el que la planta creció sólo 10 cm de altura, en tanto que el testigo registró 13 cm láminas 33(a) y 33(b) y cuadro 44.

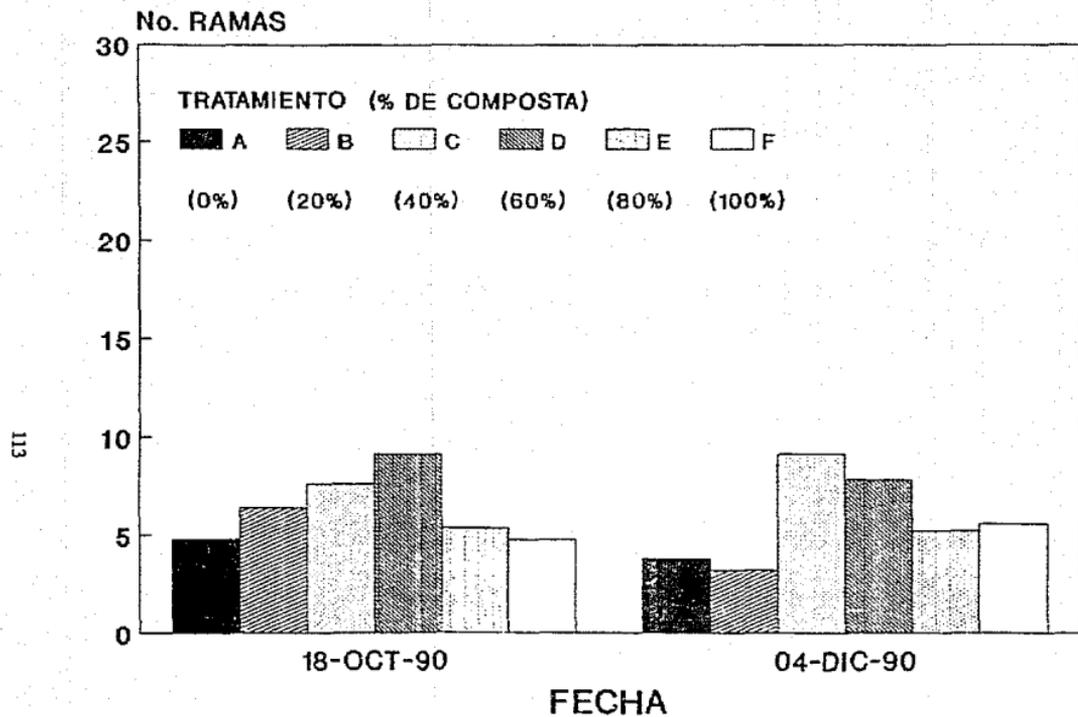


Lámina 32. Registro del número de ramas en plantas de amaranta con sustrato de vivero y mezclas de composta

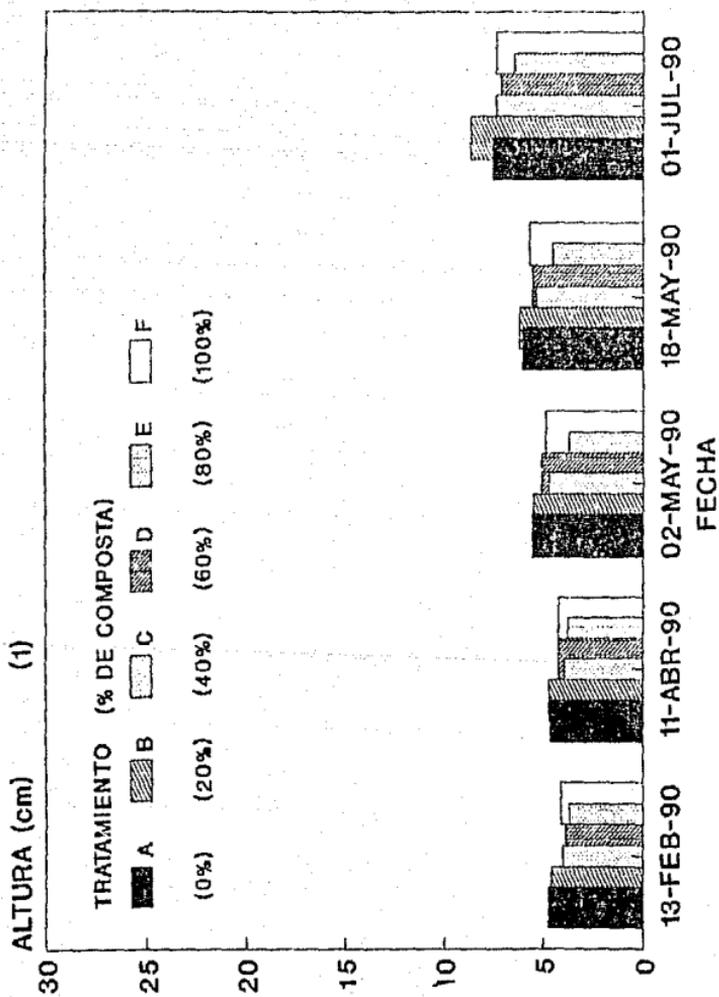


Lámina 33 (a). Registro de altura para plantas de aralia en sustrato de vivero y mezclas de composta

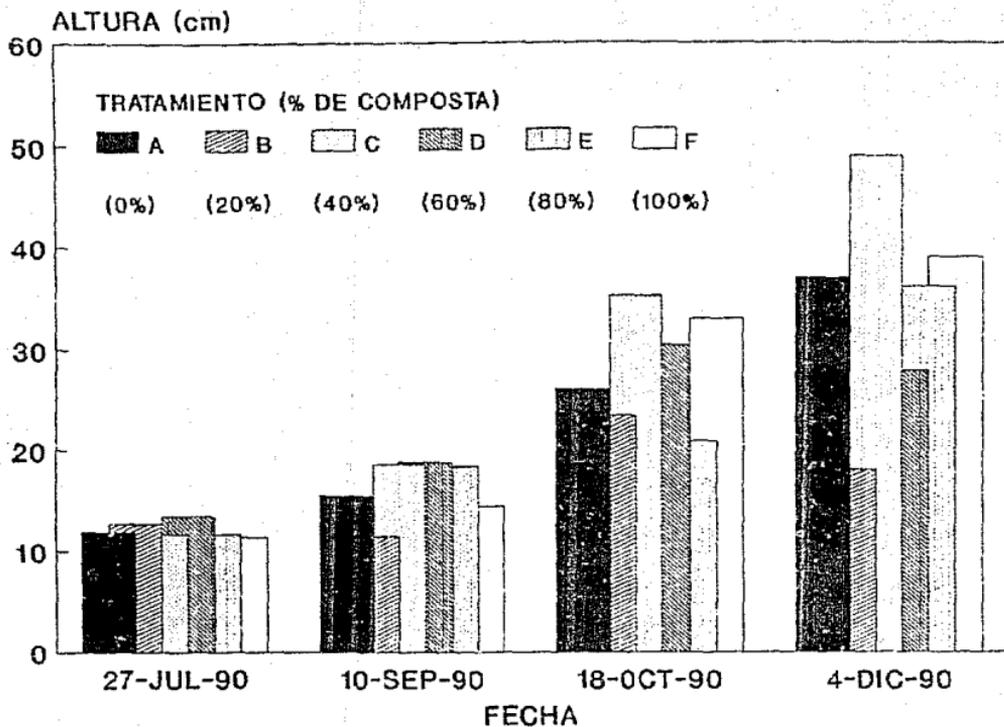


Lámina 33 (b). Registro de altura para plantas de aralia en sustrato de vivero y mezclas de composta

Cuadro 44. Altura alcanzada en cada tratamiento para la aralia

Especie:	Aralia		Parámetro:		Altura (cm)	
Fecha	T r a t a m i e n t o					
	A	B	C	D	E	F
13/03/90	4.74	4.54	3.96	3.82	3.62	4.06
11/04/90	4.60	4.70	3.90	4.20	3.70	4.20
02/05/90	5.56	5.48	4.68	5.06	3.66	4.84
18/05/90	6.02	6.18	5.34	5.52	4.52	5.68
01/07/90	7.54	8.66	7.38	7.12	6.48	7.38
27/07/90	8.58	10.70	8.70	8.30	6.60	8.66
14/08/90	9.30	12.00	9.80	8.80	7.26	10.10
25/09/90	10.60	15.10	12.00	11.00	8.40	13.50
18/10/90	11.20	18.00	13.60	13.00	9.60	15.40
04/12/90	13.3	20.9	14.2	15.30	10.1	17.5

Para el parámetro de hojas los mejores resultados se lograron con los tratamientos B, C, D y F. Los valores más bajos se obtuvieron con el tratamiento E y el testigo, en donde se verificó una completa correlación con la altura, cuadro 45 y lámina 34.

Cuadro 45. Número de hojas en cada tratamiento para la aralia

Especie:	Aralia		Parámetro:		No. de hojas	
Fecha	T r a t a m i e n t o					
	A	B	C	D	E	F
10/08/90	6.2	7.4	6.6	5.4	5.4	6.8
25/09/90	7.0	8.4	7.6	7.4	7.0	8.0
18/10/90	5.2	8.0	6.4	6.6	4.6	6.6
04/12/90	5.8	8.6	7.6	7.4	6.2	7.0

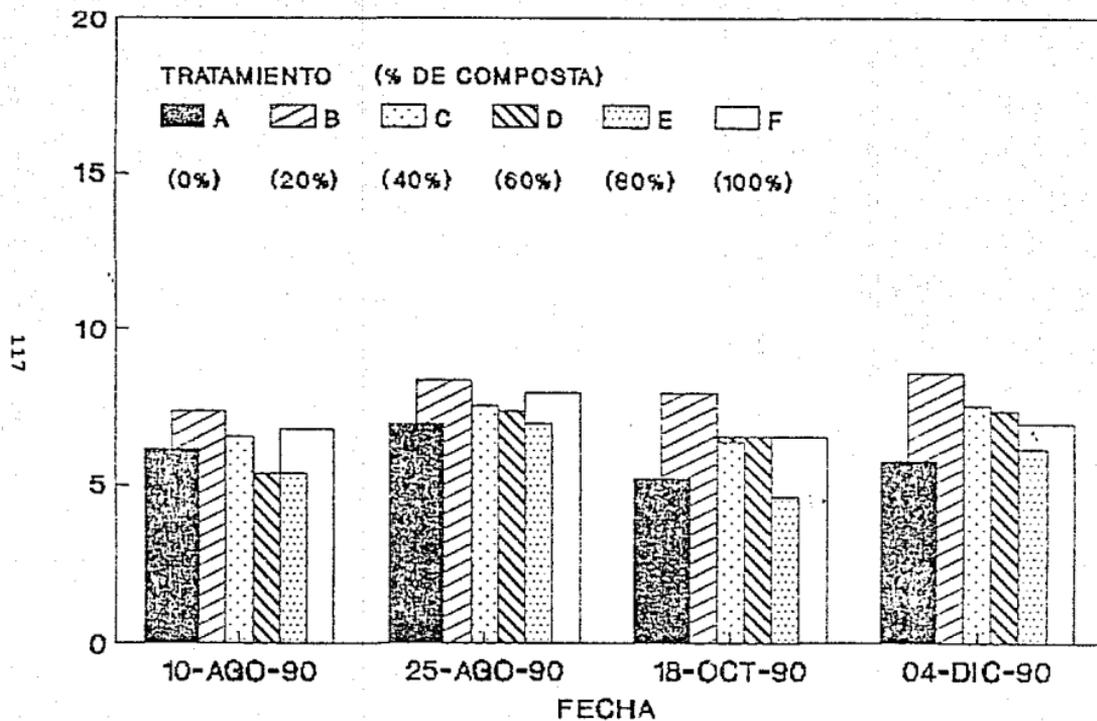


Lámina-34. Registro del número de hojas para plantas de aralia con sustrato de vivero y mezclas de composta

### 6.3.3 Registro de crecimiento de la bugambilia

Para la bugambilia la respuesta a los diferentes tratamientos dio como resultado un mayor crecimiento promedio (43 cm) con el tratamiento F (100% composta), 10 cm más respecto al testigo. El tratamiento de menor valor fue el D (60% composta), con el que alcanzó 29 cm de altura, cuadro 46 y lámina 35.

Cuadro 46. Altura desarrollada en cada tratamiento para la bugambilia

Especie:	Bugambilia		Parámetro:	Altura (cm)		
Fecha	T r a t a m i e n t o					
	A	B	C	D	E	F
03/05/90	9.46	10.70	10.40	10.16	10.40	10.60
25/07/90	17.10	22.10	20.40	24.00	22.50	24.20
10/08/90	20.00	24.56	24.60	23.40	27.40	20.60
10/09/90	24.80	29.00	27.20	24.60	36.00	29.80
18/10/90	26.20	28.80	29.60	26.60	32.90	38.00
04/12/90	33.90	31.60	30.60	29.10	32.40	43.00

Los mejores tratamientos para el número de brácteas florales fueron el E, C y D. Con valores promedio de 19, 16 y 15 brácteas, respectivamente. El valor más bajo lo obtuvo el testigo, con un promedio de 6 brácteas florales, cuadro 47 y lámina 36.

Cuadro 47. Brácteas florales desarrolladas en cada tratamiento para la bugambilia

Especie:	Bugambilia		Parámetro:	No. de brácteas florales		
Fecha	T r a t a m i e n t o					
	A	B	C	D	E	F
18/10/90	4.60	22.60	4.80	8.60	11.40	6.60
04/12/90	6.00	14.20	16.40	14.60	18.80	12.40

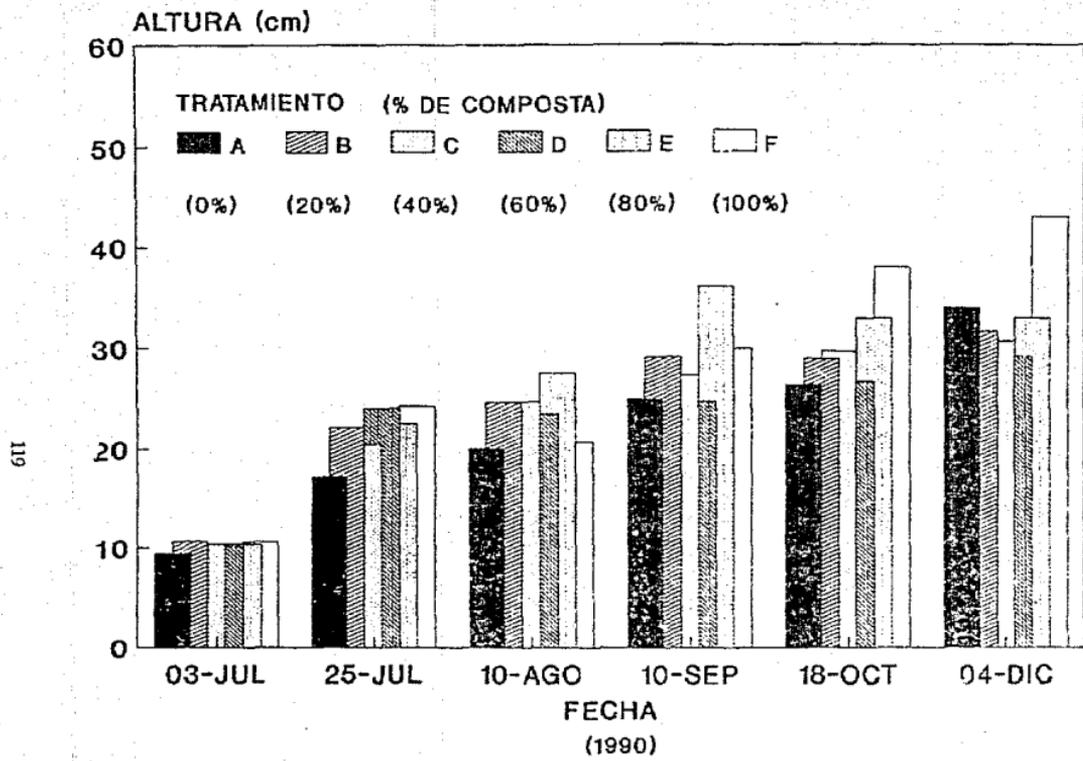
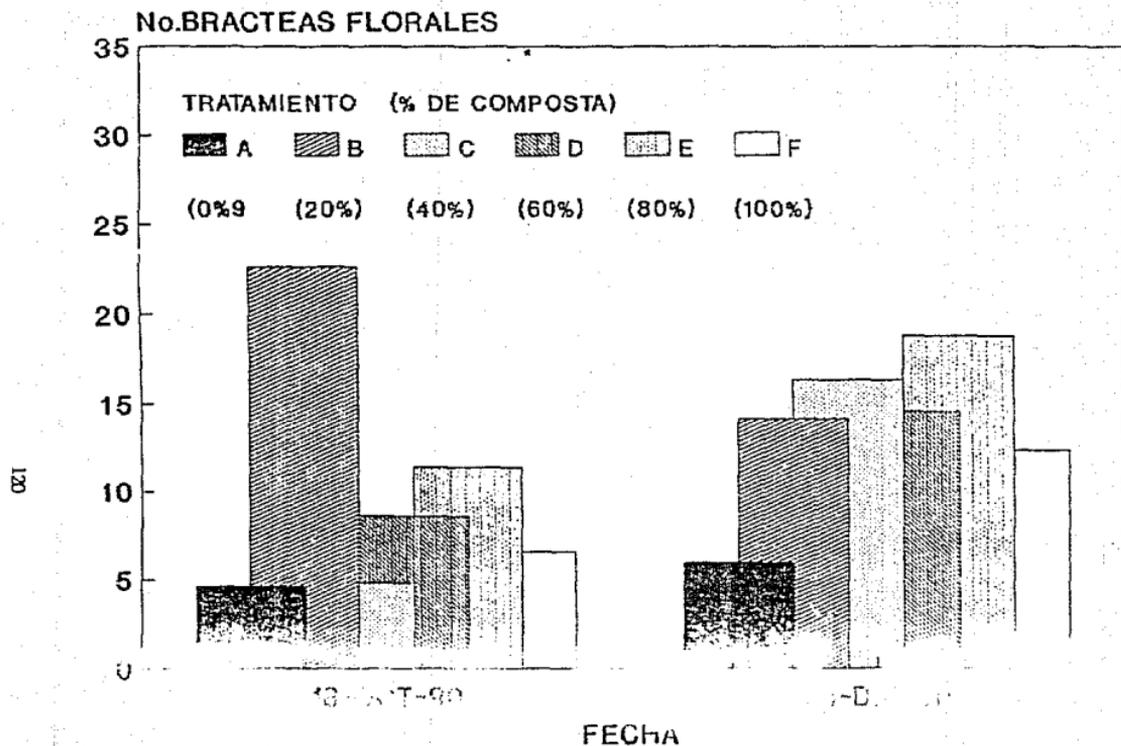


Lámina 35. Registro de altura de bugambilia con sustrato de vivero y mezclas de composta



\* HOJAS MODIFICADAS QUE ENVUELVEN A LAS FLORES

Lámina 36. Número de brácteas de bugambilia con sustrato de vivero y mezclas de composta

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en la experiencia obtenida en el manejo de los experimentos, en los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, así como en el crecimiento de plantas de ornato, se elaboraron las siguientes conclusiones.

### 7.1 Remoción de contaminantes

La remoción de contaminantes fue: coliformes fecales (100%) y enterococos fecales (78%), dilución de metales pesados (25 y 66%), los valores de tóxicos orgánicos no fueron concluyentes debido a que se analizaron pocas muestras, sin embargo se observó una reducción significativa de antraceno (97%), benzo (k) fluoranteno (100%), aldrín (100%) y alfa BHC (100%). Por lo tanto, se concluye que el proceso de composteo es adecuado para la remoción y estabilización de contaminantes en lodos residuales de origen industrial, como los generados en ECCACIV.

### 7.2 Contenido de nutrimentos en la composta

Con base en el porcentaje de nutrimentos obtenido por medio del proceso de composteo, como: nitrógeno, 4.2- 5.0%; fósforo, 0.94%; potasio, 0.36%; contenido de materia orgánica, 48.24%; y capacidad de intercambio catiónico de 42.6 a 69 meq/100 g, en concentraciones tan elevadas como en los suelos orgánicos, se concluye que este producto es útil para el desarrollo de plantas de ornato y como acondicionador de suelos.

### 7.3 Uso de composta como sustrato de vivero

En la evaluación de la composta como sustrato de vivero para el crecimiento de plantas de ornato, el análisis estadístico no señaló diferencias significativas entre los distintos tratamientos. Pero esto no prueba que no existan diferencias reales entre ellos. Se observó un porcentaje mayor de crecimiento de los tratamientos en los que se utilizó la composta con respecto a los testigos. Por lo tanto, la composta puede utilizarse como sustituto de las tierras orgánicas que actualmente usan los viveristas de la región.

#### 7.4 Recomendaciones

Con el propósito de aumentar la remoción de contaminantes se recomienda optimar el control de la temperatura y ventilación, por medio de equipo manual o automático. Además es recomendable que este rango se prolongue hasta la etapa de curado por lo menos los tres primeros días para garantizar una completa remoción de patógenos.

Para el tratamiento de lodos de tipo industrial se recomienda un estudio más exhaustivo del comportamiento de tóxicos orgánicos durante el proceso de composteo y curado, ya que la presencia de estos contaminantes restringe el uso de la composta.

## Bibliografía

Alexander Martín, 1980, Introducción a la microbiología del suelo, AGT Editor, S.A., 404 a 426 pp.

American Public Health Association, 1976, Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, 14 th edition, Washington, D.C. 92, 95, 489 y 493 pp.

Benedict, Arthur, Epstein Elliot and John N. English, 1986, Muncipal sludge composting technology evaluation. Journal WPCE, Volume 58, Number 4, 280-281 pp.

Bidwell, R.G.S., 1979, Fisiología Vegetal, 1a. ed. en Esp., AGT Editor, S.A., México, D.F., 271 pp.

Bishop, Paul L. y Christine Godfrey, 1986, "Nitrogen Transformations During Sludge Composting", BioCycle, vol 24, núm. 4, USA, 34 a 39 pp.

Black, C.A., ed., 1965, Methods of Soil Analysis, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 922, 371, 374, 1398, 1467, 1163, 545, 520, 891, 902, 1035 pp.

Burge, W.D. and Colaccio. 1979. Criteria for achieving pathogen destruction during sewage sludge composting. Natl. Conf. and Exhib., on Municipal and Industrial Sludge Composting. Sponsored by Information Transfer, Inc. Rockville, MD (In Press).

Colacico, E., G. B. Epstein, G. Willson, J.F. Parr, and L. A. Christensen, 1977, Cost of Sludge Composting, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, ARS-NE-79, February, 1-18 pp.

Council for Agricultural Science and Technology, 1980, Effects of sewage sludge on the cadmium and zinc content of crops. Council Agr. Sci. and Tech., Rpt. 83, 77 pp.

Chaney, R.L., Crop and food-chain effects of toxic elements in sludges and effluents, 1973, In Proc., Jt. Conf., Recycling Municipal Sludges and Effluents on Land, Nat. Assoc. St. Univ. and Land Grant Coll., Wash., D.C., 129-141 pp.

Chaney, R.L. and P.M. Giordano, 1977, Microelements as related to plant deficiencies and toxicities, In: L.F. Elliot and F.J. Stevenson (ed.) Soils for Management and Utilization of Organic Wastes and Wastewaters, Soil Sci., Soc. Amer. Madison, Wisconsin, 234-279 pp.

Chaney, R.L., 1978, Heavy metal limitation in use of sludge and sludge compost on cropland, In Conf. Sludge Managt. Alternatives: What can we do after the 1981 ocean disposal ban?, Proc. 54-59, 115-127 pp. Scientists Com. Pub. Inform., Nueva York.

Chaney, R.L., 1980. Health risks associated with toxic metals in municipal sludge, p 57-58, In: G. Bitton, B.L. Damron, G.T. Edds, J.M. Davidson (eds) sludge-health risks of land application, Ann Arbor Sci. Pub., Ann Arbor, Mich.

Chaney, R.L., 1983, Potential effects of waste constituents on the food chain, In: J.F. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kla (eds.) Land Treatment of Hazardous Wastes, Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J.

Environmental Protection Agency, 1978, Process Design Manual, Municipal Sludge Landfill, EPA-625/1-78-010 SWL705.

Environmental Protection Agency, 1979, Process Design Manual, Sludge Treatment and Disposal, EPA Technology Transfer, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati OH. 1979.

Environmental Protection Agency, 1985, Seminar Publication Composting of Wastewater Sludge, USEPA/625/4-85/014, Cincinnati OH, 1-67 pp.

Environmental Protection Agency, 1986a, Land Application of Municipal Sludge, EPA-625/1-83-016, Cincinnati, OH., A-1 pp.

Environmental Protection Agency, 1986b, Handbook Permit Writer's Guide to Test Burn Data, Hazardous Waste Incineration, EPA/625/5-86/012, September, 1-3 pp.

Environmental Protection Agency, 1988a, Analytical Method for the National Sewage Sludge Survey, USEPA, Office of Water Regulations and Standards (WH-522), Industrial Technology Division, August, 3-115 pp.

Environmental Protection Agency, 1988b, Guidance for Writing Case-by-Case Permit Requirements for Municipal Sewage Sludge, DRAFT, USEPA, Washington, September, 30, 36, 74, 41 y 118 pp.

Epstein, E., J.M. Taylor, and R.L. Chaney, 1976, Effects of Sewage Sludge and Sludge Compost Applied Soil on Some Physical and Chemical Properties, J. Environ. Qual., 5:422-426 pp.

Farrel, J. B. and G. Stern, 1974, Methods for reducing the infection hazard of wastewater sludge, In "Radiation for a clean environment." International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 19-28 pp.

Felipo, M.T., et al., 1981, Reutilización de aguas y lodos residuales procedentes de depuradoras municipales a través del suelo, Anales de Edafología y Agrobiología, 2062-2067 pp., España.

Fistein, M.C., F.C. Miller, P.F. Strom., 1986, Monitoring and evaluating composting process performance. Journal WPCF, Volume 58, number 4, 272-278 pp.

Finstein, M.S., Miller, F.C., Hogan, J.A. and Strom, P.F., 1986, Analysis of EPA Guidance on Composting Sludge, Part I-Biological Heat Generation and Temperature. BioCycle, January, 20-26 pp

Garrigan, G.A., 1977, Land application guidelines for sludge contaminated with toxic elements, Journal Water Pollution Control Federal, Vol. 49.

Golueke Clarence, G., and Luis F. Díaz, 1987, Composting and the Limiting Factor Principle, BioCycle, april, 22-61 pp.

Gray, K.R., K. Sherman, and A.J. Biddlestone, 1971, A review of composting-Part 1, Process Biochem. 6:32-36 pp.

Haug Roger, Tim, 1979a Compost Engineering, Principles and Practice. Ann Arbor Science, Michigan, U.S.A, 213-245 pp.

Haug, R.T. 1979b. Engeneering principles of sludge composting. Jan. Water Pollution Control Fed. 51:2189-2206 pp.

Hirai, Mitsuyo F., et al., 1988, Measuring for Composting Maturity: Using the Organic-Carbon: Organic-Nitrogen Ratio in Water Extract, Managing Sludge by Composting. The J.G. Press Inc, USA.

Lawrence J. Sikora, George B. Willson, and James F. Parr, 1989, Adapting the Beltsville Aerated Pile to Method to Local Situations. Biological Waste Management and Organic Resources Laboratory Sciences and Education Administration, U.S. Department of Agriculture Beltsville, Maryland. Información personal.

Lossin, R.D., 1971, Compost Studies, Part III. Compost Sci. 12, 2, 31 pp.

Maeda Martínez Celina, 1986, Análisis de crecimiento: Un Método para Cuantificar el Rendimiento Biológico de las plantas, CIAN Seminarios Técnicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, vol. 9, núm. 5, 121 a 138 pp.

Maskew Fair, Gordon et al., 1954, Waste Supply and Waste-Water Disposal. John Wiley and Sons. Inc., London.

Moreno Muñoz A. 1982. Efectos de la fertilización orgánica y mineral sobre el rendimiento en grano y sus componentes del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Michoacan 12-A-3. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Iguala Guerrero, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Superior Agropecuario del Estado de Guerrero.

Neff, M.J., 1979, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environment, Applied Science Publishers Ltd, 196 a 225 pp.

Ortiz Villanueva, B. 1977, Fertilidad de suelos. Universidad de Chapingo, México, 123-127 pp.

Pan American Health Organization, World Health Organization, Environmental Health Program, 1989, Health and Environmental Criteria for the Utilization of Sewage Sludge on Land, PAHO, WHO and EHP, Washington, D.C., Series No. 8.

Pelczar, Michael J., Jr., Roger D. Reidy E.C.S. Chan, 1991, Microbiología, (2a. ed. en español), McGraw-Hill 164 pp.

Poincelot, R.P. 1975. The Biochemistry and Methodology of Composting. Conn. Agric. Exp. Sta. Bull. No. 754, 18 pp.

Potash and Phosphate Institute. 1979. Soil Fertility Manual. Reprinted by permission of the Potash and Phosphate Institute, Atlanta, GA for Hach Company. 10 pp.

Ramírez C. E.; Cardoso L. y López S., 1991, Estudio de factibilidad para el montaje de una planta de composteo, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe interno, abril, 4-25 pp.

Ramírez Camperos, E., L. Cardoso Vigueros y S. López Armenta, 1991, Manual para el composteo de lodos residuales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe interno.

Reyes Castañeda Pedro, 1978, Diseño de experimentos agrícolas. Ed. Trillas, 344 pp.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Gaceta Ecológica, Vol. II, No. 11, Noviembre 1990. SEDUE. 3,2,5 y 6 pp.

Seoanez y Calvo, Mariano, 1978, Aprovechamiento y tratamientos agrarios de las aguas residuales urbanas, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, España, 336 pp.

Stevenson, F.J., 1972. Humus Chemistry, Génesis, Composition and Reactions, John Wiley and Sons, New York, 443 pp.

Urbassik, Mork, 1978, Problems Associated with Land Applications of Wastewater and Sewage Sludge. Stanford University, March 21.

Willson, G.B., J.F. Parr, E. Epstein, P.B. Marsh, R.L. Chaney, D. Colacicco, W.D. Burge, L.J. Sikora, C.F. Tester, and S.B. Hornick. 1980, A Manual for the Composting of Sewage Sludge by the Beltsville Aerated Pile Method. Joint U.S. Dept. of Agriculture U.S. Environmental Protection Agency, 64 pp.

Willson B. George and David Dalmat, 1986, Measuring Compost Stability, BioCycle, August, 34-37 pp.

Zanoni, Alphonse E., M. Asce and David L. Mueller, 1982, Calorific Value of Wastewater Plant Sludges, Journal of Environmental Engineering Division ASCE, vol. 108, núm. EE1, USA, 187-195 pp.

Zucconi Franco and Marco de Bertoldi, 1987, Specifications for solid waste compost, BioCycle, Mayo-Junio, 56-61 pp.

## **ANEXO 1**



Resultado de la composición del lodo (libras):

5.0

AGUA	3.89
SVB	0.355
SVNB	0.355
CENIZAS	0.394

Composta

El balance de energía se hizo considerando que se quiere una composta con un 60 % de sólidos totales.

Teóricamente, cuando termina el proceso de composteo, los SVB del lodo se reducen a cero y sus SVNB y cenizas forman los sólidos totales en la composta.

Características requeridas en la composta :

S = 0.6  
agua = 0.4

Resultado de la composición de la composta (libras):

	0.499	AGUA	
Sólidos totales =	0.749	SVNB	0.355
		CENIZAS	0.394

Requerimientos de energía para obtener una composta con 60 % de sólidos:

La energía en el sistema se obtiene al descomponerse la materia orgánica y es igual a la cantidad de SVB multiplicada por la capacidad calorífica del material, la cual sirve para elevar la temperatura y evaporar el agua.

Suponiendo que los sólidos totales que corresponden a un 60 % en la composta son 0.749 libras, el 40 % restante es igual a 0.499 libras, las que corresponden a las libras de agua de la composta.

libras de agua a evaporar	=	libras de agua en el lodo	-	libras de agua de la composta
3.391 lb	=	3.89 lb	-	0.499 lb

Energía requerida para evaporar el agua	=	libras de agua a evaporar	x	agua calor latente de vaporización del agua
5086.5 BTU	=	3.391 lb	x	1500 BTU/lb

La capacidad calorífica del lodo es 8081.74 BTU/lb.

Energía suministrada por el lodo	=	SVB del lodo	x	capacidad calorífica
2869.02 BTU	=	0.355 lb	x	8081.74 BTU/lb

Déficit de energía requerida para evaporar el agua	=	energía requerida para evaporar el agua	-	energía suministrada por el lodo
2217.48 BTU	=	5086.5 BTU	-	2869.02 BTU

El balance anterior indica que el lodo no tiene suficiente energía para obtener la composta requerida.

Este déficit de energía se obtiene adicionando un material acondicionador.

Bagazo de caña (material acondicionador)

Características del bagazo:

$$\begin{aligned}S_B &= 0.947 \\V_B &= 0.808 \\K_B &= 0.3\end{aligned}$$

Capacidad calorífica del bagazo = 7779.55 BTU/lb

Cálculo para determinar la cantidad de bagazo que se debe utilizar como material acondicionador:

La energía requerida para evaporar 3.39 libras de agua es de 5086.5 BTU, la cual la proporcionará la mezcla lodo-bagazo.

$$\text{Energía requerida} = \text{energía suministrada por el lodo} + \text{energía suministrada por el bagazo}$$

$$5086.5 \text{ BTU} = 2869.02 \text{ BTU} + \text{SVB} \times (7779.55 \text{ BTU/lb})$$

Despejando los SVB:

$$\text{SVB} = \frac{5086.5 \text{ BTU} - 2869.02 \text{ BTU}}{7779.55 \text{ BTU/lb}}$$

$$\text{SVB} = 0.285 \text{ lb}$$

Para obtener la cantidad de bagazo aplicamos la fórmula:

$$\text{SVB} = K_B V_B S_B X_B$$

despejamos  $X_B$  :

$$X_B = \frac{\text{SVB}}{K_B V_B S_B} = \frac{0.285}{(.3)(.808)(.947)}$$

$$X_B = 1.242 \text{ lb (cantidad de bagazo requerido para composteo)}$$

Composición del bagazo:

$$\begin{aligned} \text{SVNB} &= V_B S_B X_B (1 - K_B) \\ \text{SVNB} &= (.808) (.947) (1.242) (1 - .3) \\ \text{SVNB} &= 0.665 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cenizas} &= S_B X_B (1 - V_B) \\ \text{Cenizas} &= (.947) (1.242) (1 - .808) \\ \text{Cenizas} &= 0.226 \end{aligned}$$

Resultado de la composición (libras):

1.242	AGUA	
	SVB	0.285
	SVNB	0.665
	CENIZAS	0.226

Balance final de los materiales en el composteo (libras):

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">4.99</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">AGUA</td> <td style="padding-left: 10px;">3.89</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">1.104</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">SVB</td> <td style="padding-left: 10px;">0.355</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0.749</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">SVNB</td> <td style="padding-left: 10px;">0.355</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0.394</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">CENIZAS</td> <td style="padding-left: 10px;">0.394</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> </td> <td style="padding-left: 10px;"> </td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">lodo</p>	4.99	AGUA	3.89	1.104	SVB	0.355	0.749	SVNB	0.355	0.394	CENIZAS	0.394	0			<p>+</p> <table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">1.24</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">AGUA</td> <td style="padding-left: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">1.176</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">SVB</td> <td style="padding-left: 10px;">0.285</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0.891</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">SVNB</td> <td style="padding-left: 10px;">0.665</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0.226</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">CENIZAS</td> <td style="padding-left: 10px;">0.226</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> </td> <td style="padding-left: 10px;"> </td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">bagazo</p>	1.24	AGUA		1.176	SVB	0.285	0.891	SVNB	0.665	0.226	CENIZAS	0.226	0			<p>-----&gt;</p> <table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">2.733</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">AGUA</td> <td style="padding-left: 10px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">1.64</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">SVNB</td> <td style="padding-left: 10px;">1.02</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0.62</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">CENIZAS</td> <td style="padding-left: 10px;">0.62</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> </td> <td style="padding-left: 10px;"> </td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">composta</p>	2.733	AGUA		1.64	SVNB	1.02	0.62	CENIZAS	0.62	0		
4.99	AGUA	3.89																																										
1.104	SVB	0.355																																										
0.749	SVNB	0.355																																										
0.394	CENIZAS	0.394																																										
0																																												
1.24	AGUA																																											
1.176	SVB	0.285																																										
0.891	SVNB	0.665																																										
0.226	CENIZAS	0.226																																										
0																																												
2.733	AGUA																																											
1.64	SVNB	1.02																																										
0.62	CENIZAS	0.62																																										
0																																												

Para obtener la cantidad total de la composta utilizamos :

$$\text{cantidad total} = \frac{1.64}{60\%} \times 100\%$$

$$\text{cantidad total} = 2.733 \text{ lb}$$

Con esto obtenemos que la mezcla de 5 lb de lodo con 1.242 lb de bagazo nos da 2.73 lb de composta con un 60 % de sólidos.

Esto quiere decir que la relación en peso lodo-bagazo es en la siguiente proporción:

4.03 : 1

## **ANEXO 2**

## PORCENTAJES AGRONOMICOS

Procedimiento para calcular la cantidad de composta que puede ser aplicada al suelo de acuerdo a porcentajes agronómicos <sup>(5)</sup>:

En primer lugar se debe conocer la cantidad de nitrógeno que se encuentra presente en el material que va a ser aplicado, para lo cual se debe seguir la siguiente ecuación:

$$Nd=C[(NO_3) +kv(NH_4) +F(0-1)(N_o)]10$$

Donde:

- $N_d$  = contenido de nitrógeno en la composta, kg/ha.
- $C$  = composta disponible, aquí se asume 1 ton.
- $NO_3$  = porcentaje de nitrato en la composta.
- $Xv$  = factor de volatilización 1.0, suponiendo que la composta es incorporada al suelo y de esa manera se evita la pérdida de nitrógeno amoniacal por volatilización, que podría llegar a ser hasta del 50%, lo cual alteraría este factor.
- $NH_4$  = porcentaje de ión amonio.
- $F$  = factor de mineralización para el nitrógeno orgánico en el primer año, expresado como una fracción. Para la composta es de 10%.
- $N_o$  = porcentaje de nitrógeno orgánico.

Si asumimos los siguientes valores para una composta tenemos que:

- $NO_3 = 0$
- $NH_4 = 2.5\%$
- $N_o = 5$

El desarrollo sería:

$$Nd=1[(0) +1(2.5) + (0.1)(5.0)]10=30kg/Nd/ton$$

Como la composta que es aplicada sigue un proceso de mineralización durante el primer año y los subsecuentes, se debe calcular el nitrógeno remanente y considerarlo en las siguientes aplicaciones.

Asumimos como en el ejemplo anterior que tenemos 1 tonelada de composta, con 5% de nitrógeno orgánico, los factores para la mineralización de la composta son los siguientes:

#### FACTORES DE MINERALIZACION DE LA COMPOSTA

Año	F
0-1	0.10
1-2	0.05
2-3	0.03

Tenemos entonces que el nitrógeno remanente puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$N_o = (0.05) (1 \text{ ton/ha}) (1000 \text{ kg/t}) = 50 \text{ kg/ha}$$

Proceso de mineralización en tres años:

Nitrógeno orgánico	primer año = (0.10) (50 kg/ha) = 5 kg/ha
	segundo año = 50 - 5 = 45
	= (0.05) (45) = 2.25 kg/ha
	tercer año = 45 - 2.25 = 42.75
	= (0.03) (42.75) = 1.3 kg/ha

De acuerdo a los requerimientos de nitrógeno de un cultivo dado y el nitrógeno en la composta se pueden calcular las toneladas de composta que es necesario aplicar:

$$\text{Composta/ha} = \frac{N\text{-requerido (kg/ha/año)}}{N\text{-disponible (kg/ton)}}$$

Si se asume que un cultivo de maíz requiera de 190 kg de nitrógeno por hectárea por año y la composta que se va aplicar tiene 30 kg de  $N_o$  por tonelada tenemos que:

$$\text{Composta/ha} = \frac{190 \text{ kg-N/ha/año}}{30 \text{ kg-Nd/ton}} = 6.3 \text{ ton-composta/ha}$$

La dosis de composta puede ser calculada también por los requerimientos de fósforo del cultivo:

$$\text{Composta (ton/ha)} = \frac{F\text{-requerido (kg/ha/año)}}{F\text{-disponible (kg/ton)}}$$