



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

---

---

**División de Ciencias e Ingeniería**

**“Diseño, construcción y evaluación de una Planta Piloto de composteo de lodos residuales en la Planta de tratamiento “Primer Centenario” de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo”**

**TESIS**  
**Para obtener el grado de**  
**INGENIERO AMBIENTAL**

**Presenta**  
**Jorge Antonio Dzul Chi**

**Director de Tesis**  
**Dra. Elizabeth Miranda Tello**

**Chetumal, Quintana Roo, México, julio de 2008**

# UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

---

División de Ciencias e Ingeniería



Tesis elaborada bajo la supervisión del comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

Director: \_\_\_\_\_  
Dra. Elizabeth Miranda Tello

Asesor Titular: \_\_\_\_\_  
M.C. Juan Carlos Ávila Reveles

Asesor Titular: \_\_\_\_\_  
Ing. Roberto Chim Interian

Asesor Suplente: \_\_\_\_\_  
M.C. Jose Luís Guevara Franco

Asesor Suplente: \_\_\_\_\_  
M.C. Laura Patricia Flores Castillo

Chetumal, Quintana Roo, México, julio de 2008

*Dedicado a .....*

***Mi Madre***

***Mi esposa e hija***

***Mis hermanos***

*Porque gracias a su apoyo, motivación y consejo, he llegado a realizar una de mis metas, la cual constituye la satisfacción más valiosa que pudiera recibir y entregar para continuar con mi superación. Este triunfo lo comparto con ustedes*

## **Agradecimientos**

*En verdad agradezco:*

*A Dios por la vida, la salud y el amor que siempre me ha dado para disfrutar los momentos felices y afrontar los días malos con la esperanza de un mejor mañana.*

*A mi madre por el esfuerzo realizado por mi educación, su paciencia y consejos invaluable que me sirven cada día para cumplir mis metas.*

*A mi esposa e hija que son el motivo para la realización de mis planes.*

*A la Universidad de Quintana Roo (UQROO) que como Casa Magna estoy orgulloso de ser egresado.*

*A todos mis maestros que me impartieron clases que con mucho interés se preocuparon por mi formación profesional.*

*A mis amigos y compañeros universitarios con quienes compartí momentos inolvidables de mi vida.*

*A la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) que me integró a su gran equipo laboral y que ha sido motor para adquirir experiencia profesional.*

*Al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica (CONACYT-GOBIERNO DEL ESTADO DE QUINTANA ROO) que me otorgó una beca y financió el Proyecto QROO-2006-C01-55927 que como parte de sus productos es la presente tesis.*

*A la Dra. Elizabeth Miranda Tello por su asesoría invaluable, tiempo y preocupación por la conclusión de este proyecto y a los M.C. Juan Carlos Ávila Reveles, Ing. Roberto Chim Interian, M.C. Jose Luís Guevara Franco y M.C. Laura Patricia Flores Castillo que siempre creyeron en mí para la conclusión de este Proyecto.*

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DE  
COMPOSTEO DE LODOS RESIDUALES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
“PRIMER CENTENARIO” DE LA CIUDAD DE CHETUMAL, Q. ROO”.**

## Índice General

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Índice General.....	III
Listado de Tablas.....	V
Listado de Figuras.....	VI
Glosario de términos.....	VII
Resumen.....	1
<b><u>CAPITULO 1</u> Introducción</b>	
1.1 Generación de lodos residuales.....	3
1.2 Características de los lodos residuales.....	4
1.2.1. Características físicas.....	4
1.2.2. Características químicas.....	5
1.2.3. Características biológicas.....	6
1.3 Composición de lodos residuales.....	7
1.4 Principales métodos de tratamiento de lodos.....	10
1.5 Marco jurídico de regulación.....	11
1.6 Descripción de los procesos productivos aplicados en la Planta “Primer Centenario”	12
1.6.1 Procesos de tratamiento de agua residual.....	13
1.6.1.1 Operaciones físicas unitarias (Pretratamiento).....	13
1.6.1.2 Procesos biológicos unitarios.....	14
1.6.1.3 Procesos químicos unitarios.....	14
1.6.2 Procesos de tratamiento de lodos.....	15
1.7 Composteo de lodos residuales.....	16
1.7.1 Bases teóricas del proceso de composteo.....	16
1.7.1.1 Etapas de composteo.....	16
1.7.1.2 Factores que influyen en el proceso de composteo.....	17
1.7.2 Clasificación de los sistemas de composteo.....	20
1.8 Antecedentes.....	21
1.9 Justificación.....	23
1.10 Objetivos.....	24
<b><u>CAPITULO 2</u> Materiales y métodos</b>	
2.1 Área de estudio.....	25
2.2 Diseño de la Planta Piloto.....	26
2.2.1 Criterios de planeación.....	26
2.2.2 Balance de masa y energía.....	28
2.2.3 Dimensionamiento de las áreas.....	31
2.3 En la construcción de la Planta Piloto.....	33

2.3.1 Gestión de recursos.....	33
2.3.2 Proceso de contratación de obra.....	33
2.3.3 Construcción y supervisión de obra.....	33
2.3.3.1 Sistemas de ventilación y trituración.....	34
2.3.4 Costos de inversión.....	35
<b><u>CAPITULO 3 Resultados y Discusión</u></b>	
3.1 En el diseño y construcción de la Planta Piloto.....	37
3.2 En la evaluación de la Planta Piloto.....	38
3.2.1 Etapa de composteo.....	38
3.2.1.1 Preparación de mezclas.....	38
3.2.1.2 Monitoreo del proceso de composteo.....	40
3.2.1.3 Generación de olores y atracción de vectores.....	44
3.2.2 Muestreo y análisis de control de calidad de los productos obtenidos.....	44
3.2.3 Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por ECOSUR...	45
3.2.4 Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por Laboratorio Acreditado.....	49
3.2.5 Análisis de resultados microbiológicos obtenidos por ECOSUR y el Laboratorio Acreditado.....	53
<b><u>CAPITULO 4 Conclusiones y Recomendaciones</u></b>	
Conclusiones y Recomendaciones.....	57
<b><u>CAPITULO 5 Referencias bibliográficas</u></b>	
Referencias bibliográficas.....	61
Páginas WEB visitadas.....	62
<b><u>CAPITULO 6 Anexos</u></b>	
<b>Anexo I.-</b> Hoja de seguridad del polímero POLY-CAT-C5450-2.....	63
<b>Anexo II.-</b> Planos de la planta piloto de composta.....	64
<b>Anexo III. -</b> Convenio de colaboración CAPA-ECOSUR.....	65
<b>Anexo IV.-</b> Contrato de ejecución de obra.....	66

## Listado de Tablas

<u>Capítulo I</u>	<u>Pag.</u>
<b>Tabla 1.1</b> Niveles de densidad de microorganismos indicadores en diferentes tipos de lodos.....	6
<b>Tabla 1.2</b> Límites Máximos Permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	8
<b>Tabla 1.3</b> Concentraciones típicas de elementos en un lodo estabilizado y fertilizante comercial.....	9
<b>Tabla 1.4</b> Métodos de tratamiento y evacuación de lodos.....	10
 <u>Capítulo II</u>	
<b>Tabla 2.1</b> Características de los materiales al inicio del ciclo de composteo.....	27
<b>Tabla 2.2</b> Costos de la inversión realizada por construcción y suministro de equipos para la Planta piloto de composteo.....	35
 <u>Capítulo III</u>	
<b>Tabla 3.1</b> Preparación de 8 mezclas.....	39
<b>Tabla 3.2</b> Variaciones en la temperatura promedio diario a lo largo del proceso de composteo.....	40
<b>Tabla 3.3</b> Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por ECOSUR.....	46
<b>Tabla 3.4</b> Concentración de metales pesados en el lodo residual producido en la Planta “Primer Centenario”.....	50
<b>Tabla 3.5</b> Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por Laboratorio Acreditado.....	51
<b>Tabla 3.6</b> Clasificación de 8 mezclas de acuerdo a los resultados comparados con la NOM-004-SEMARNAT-2002.....	56

## Listado de Figuras

<u>Capítulo I</u>	<u>Pag.</u>
<b>Figura 1.1</b> Producción de lodos en una planta de tratamiento con sistema de lodos activados.....	3
<b>Figura 1.2</b> Diagrama de procesos aplicados en la Planta “Primer Centenario”.....	12
<u>Capítulo II</u>	
<b>Figura 2.1</b> Macro y micro localización de la Planta “Primer Centenario”.....	28
<b>Figura 2.2</b> Diagrama de balance de masa para el composteo de lodos.....	29
<b>Figura 2.3</b> Diagrama de flujo del proceso de composteo de lodos en pilas estáticas aireadas.....	31
<b>Figura 2.4 y 2.5</b> Preparación del sitio e inicio de las obras de construcción.....	34
<b>Figura 2.6</b> Sistema de aireación.....	35
<b>Figura 2.7</b> Sistema de trituración.....	35
<u>Capítulo III</u>	
<b>Figura 3.1</b> Instalaciones concluidas de la Planta piloto de composta “Primer Centenario”.....	37
<b>Figura 3.2</b> Variaciones en la temperatura a lo largo del proceso de composteo en las pilas estáticas.....	41
<b>Figura 3.3 y 3.4</b> Volumen de las mezclas antes y después del proceso de composteo.....	42
<b>Figura 3.5</b> Porcentajes de reducción de volumen en las 8 mezclas (tipos de composta)...	43
<b>Figura 3.6</b> Porcentaje de humedad encontrado al final del proceso de composteo en las diferentes mezclas.....	43
<b>Figura 3.7 y 3.8</b> Personal del laboratorio acreditado y equipo de muestreo para el estudio fisicoquímico y microbiológico de las 8 mezclas.....	45
<b>Figura 3.9</b> Porcentajes alcanzados de Materia orgánica.....	47
<b>Figura 3.10</b> Nitrógeno Total comparado con fertilizantes comerciales.....	47
<b>Figura 3.11</b> Conductividad eléctrica de las 8 mezclas.....	48
<b>Figura 3.12</b> Carbonatos de calcio encontrados.....	48
<b>Figura 3.13</b> Capacidad de Intercambio Catiónico en las 8 mezclas de composta.....	49
<b>Figura 3.14</b> Unidades de pH.....	52
<b>Figura 3.15</b> Fósforo aprovechable (Mg/Kg).....	52
<b>Figura 3.16</b> Comportamiento de Coliformes Fecales en 8 mezclas después de 7 y 13 semanas.....	51
<b>Figura 3.17</b> Comportamiento de Salmonella spp en 8 mezclas después de 7 y 13 semanas.....	53
<b>Figura 3.18</b> Comportamiento de Huevos de Helminto en 8 mezclas.....	55
<b>Figura 3.19</b> Clasificación de 8 mezclas interpretados de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002.....	56

## Glosario de términos

Aguas crudas	Son las aguas residuales sin tratamiento
Aguas residuales	Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.
Aguas residuales tratadas	Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para el reúso en servicios al público.
Almacenamiento	Acción de mantener en un sitio los lodos y biosólidos, hasta su aprovechamiento o disposición final.
Aprovechamiento	Es el uso de los biosólidos como mejoradores o acondicionadores de los suelos por su contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio.
Atracción de vectores	Es la característica de los lodos y biosólidos para atraer vectores como roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos.
Coliformes fecales	Bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos. Bacilos cortos Gram negativos no esporulados, también conocidos como coliformes termotolerantes (44°C – 45°C). Tienen la capacidad de fermentar la lactosa a temperatura de 44.5°C. Incluyen al género <i>Escherichia</i> y algunas especies de <i>Klebsiella</i> .
Contaminantes	Son aquellos parámetros o compuestos que, en determinadas concentraciones, pueden producir efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, dañar la infraestructura hidráulica o inhibir los procesos de tratamiento de las aguas residuales.
Desazolve	La acción de extraer sólidos provenientes de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no incluye los provenientes de las presas o vasos de regulación.
Digestión aerobia	Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en bióxido de carbono y agua por los microorganismos en presencia de oxígeno.
Digestión anaerobia	Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en gas metano, bióxido de carbono y agua por los microorganismos en ausencia de oxígeno disuelto.
Disposición final	La acción de depositar de manera permanente lodos y biosólidos en sitios autorizados.

Estabilización	Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para liberarlos de contaminantes dañinos al hombre o al medio ambiente.
Helminto	Término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humanos, animales o vegetales), de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados, y sus ciclos vitales comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no.
Huevos de helmintos viables	Huevos de helmintos susceptibles de desarrollarse e infectar.
Límite Máximo Permisible	Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido.
Lixiviado	Líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos o en suspensión.
Material acondicionador	Es cualquier material de alto contenido orgánico, no artificial, que puede mezclarse con los lodos para proveerles estructura y porosidad, permitir aireación, aumentar sólidos y la relación carbono : nitrógeno.
Mejoramiento de suelos	Es la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas.
Muestra	Parte representativa de un universo o población finita, obtenida para conocer sus características.
Parásito	Organismo animal o vegetal que vive sobre o dentro de un individuo de otra especie.
Patógeno	Microorganismo capaz de causar enfermedades, si está presente en cantidad suficiente y condiciones favorables.
<i>Salmonella spp.</i>	Bacilos móviles por sus flagelos peritricos, que fermentan de manera característica glucosa y manosa sin producir gas, pero no fermentan lactosa ni sacarosa. La mayoría produce sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S). A menudo, son patógenos para el hombre y los animales cuando se ingieren, ocasionando fiebre tifoidea y enterocolitis (conocida también como gastroenteritis).
Sólidos Totales (ST)	Son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos, que han sido deshidratados entre 103°C y 105°C, hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.
Sólidos Volátiles (SV)	Son sólidos orgánicos totales presentes en los lodos y biosólidos, que se volatilizan cuando éstos se queman a 550°C en presencia de aire por un tiempo determinado.
Terrenos con fines agrícolas	Son las superficies sobre las cuales se pueden cultivar productos agrícolas para consumo humano y animal.

## 1.2 Características de los lodos residuales

Las características físicas, químicas y biológicas del lodo dependen del origen y características de las aguas residuales crudas, del proceso de tratamiento que los genere, de la época del año y de los usos y costumbres de la sociedad que los genera (Zayas, 2005). Por tal razón en los siguientes apartados sólo se tratarán las características más representativas.

### 1.2.1 Características físicas

a) Gravedad específica: se define como la relación de peso del material a aquella de un volumen igual de agua. Los lodos raramente están compuestos de un solo tipo de sólidos y un solo tipo de líquido, por lo que la gravedad específica se calcula como:

$$\frac{I}{S_s} = \sum_{n=1}^x \left( \frac{W_i}{S_i} \right)$$

Donde:

$S_s$  = Gravedad específica del lodo

$W_i$  = Fracción de peso del *iésimo* componente del lodo.

$S_i$  = Gravedad específica del *iésimo* componente.

b) Contenido de sólidos: una gran parte de los lodos lo constituyen los sólidos en sus diferentes formas (sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos fijos, sólidos volátiles y sólidos sedimentables) y es muy importante determinarlos debido a que los lodos crudos están compuestos principalmente de agua y un porcentaje de sólidos (de 0.5 a 5%) dependiendo de su origen y del método de remoción (FUJITA, 2004).

c) Sedimentación de los lodos: la capacidad de sedimentación de un lodo, debe ser definida dentro del contexto de las condiciones en las cuales se determina la velocidad de sedimentación. La velocidad de sedimentación de los sólidos suspendidos en el agua residual, depende entre otros factores de la concentración de sólidos, de la viscosidad del líquido, del tamaño y forma del sedimentador, así como de las propiedades físicas, químicas y electrostáticas de la materia en suspensión. La velocidad de sedimentación de lodos con un contenido elevado de sólidos, esta sujeta a un mayor número de variables y aunque no nos

# **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DE COMPOSTEO DE LODOS RESIDUALES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO “PRIMER CENTENARIO” DE LA CIUDAD DE CHETUMAL, Q. ROO”.**

## **Resumen**

El objetivo del presente trabajo fue diseñar, construir y evaluar el funcionamiento de una planta piloto de composteo de lodos residuales en las instalaciones de la planta de tratamiento “Primer Centenario” de la ciudad de Chetumal. Se realizaron 2 etapas de composteo: a nivel experimental y en escala piloto (con 8 diferentes mezclas o tipos de composta cada una). Todas las mezclas fueron sometidas a un proceso de estabilización termofílica (composteo) durante períodos de 4 semanas y 3 semanas de curado. Luego de este plazo se les hicieron pruebas de calidad fisicoquímica y microbiológica para conocer su grado de estabilización. Estas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Microbiología Ambiental y el Laboratorio Institucional de Estudios de Suelos y Plantas de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) unidades Chetumal y San Cristóbal de las Casas respectivamente. Los resultados obtenidos por ECOSUR a las 7 semanas demostraron que la mezcla N° 8 presenta mejores propiedades fisicoquímicas por poseer micronutrientes mejor balanceados, mientras que los resultados microbiológicos presentaban todavía altos valores a excepción de las mezclas N° 5 y 6 que presentaron resultados de Coliformes fecales en un rango menor de  $2 \times 10^6$ , *Salmonella spp* y Huevos de helminto nulos. Adicionalmente, luego de 13 semanas de intemperización (estabilización termofílica y curado) se realizaron a las 8 mezclas en escala piloto estudios fisicoquímicos y microbiológicos por un Laboratorio Acreditado. Los resultados obtenidos por este laboratorio corroboraron los resultados fisicoquímicos obtenidos por ECOSUR y demostraron que después de ese período (13 semanas) mejoraban aún más los contenidos microbiológicos, lo que permitió interpretarlos y clasificarlos de la siguiente manera: sólo un producto (mezcla N° 1) cumple sin restricciones de uso con los Límites Máximos Permisibles que señala la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para su aprovechamiento como biosólidos tipo excelente (de acuerdo a su contenido de metales pesados) y clase A (de acuerdo a su contenido de microorganismos indicadores, patógenos y parásitos); las mezclas 3 y 7 resultaron ser Tipo excelente y Clase B por lo que se permite su aplicación para usos urbanos sin contacto directo durante su aplicación, mientras que las

restantes mezclas N° 2, 4, 5, 6 y 8 son de Tipo excelente y Clase C por lo que pueden ser utilizados con muchas restricciones sólo para usos forestales, usos agrícolas y como mejorador de suelos por su contenido de *Salmonella spp* y Huevos de helminto que aún presentaban, siempre y cuando se realicen con los Procedimientos autorizados de un Programa de Manejo Especial e Integral aprobado por las autoridades correspondientes.

## CAPITULO 1. Introducción

### 1.1 Generación de lodos residuales

Los lodos residuales son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización; mientras que los biosólidos son lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento como mejorador o acondicionador de los suelos o en cualquier actividad que represente un beneficio (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En una planta de tratamiento de aguas residuales, los lodos primarios son aquellos que se extraen de los módulos de pretratamiento y tratamiento primario (sedimentadores primarios) y consisten principalmente en arena fina, materia inorgánica y sólidos orgánicos; los lodos secundarios son lodos en exceso generados en los tratamientos secundarios biológicos como resultado de la conversión de productos de desecho solubles de efluentes primarios y partículas que escapan del tratamiento primario; mientras que los lodos químicos se obtienen del tratamiento de agua residual con sales de aluminio, hierro o cal para mejorar la remoción de los sólidos suspendidos o para precipitar algún elemento de cada tipo (Moeller *et al.*, 2005). La Figura 1.1 representa los puntos de generación de lodos en una planta de tratamiento de lodos activados.

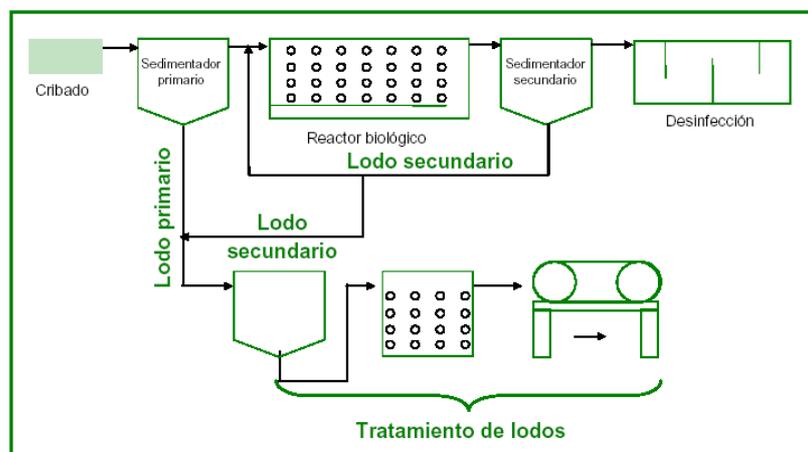


Figura 1.1 Producción de lodos en una planta de tratamiento con sistema de lodos activados (Moeller *et al.*, 2005)

dice mucho respecto de las características, es importante determinarlo cuando los lodos son de naturaleza biológica ya que están influenciados por los microorganismos que los constituyen (Zayas, 2003).

d) Tamaño de la partícula: las partículas en los lodos no sólo son extremadamente variables en tamaño, consistencia y forma, sino en su comportamiento y edad, por lo que es extremadamente difícil caracterizar a los lodos por su tamaño de partícula. Su importancia radica en la necesidad de conocer el tamaño de las partículas para evaluar la aplicabilidad de un proceso de espesamiento o secado (Zayas, 2003).

### **1.2.2 Características químicas**

a) pH: los lodos de plantas de tratamiento municipales comúnmente presentan un pH neutro, pero es común encontrar valores de pH muy bajos en los lodos originados por aguas residuales industriales y valores elevados cuando se aplican métodos de estabilización alcalina a los lodos.

b) Parámetros inorgánicos: los compuestos inorgánicos incluyen todas aquellas combinaciones de elementos que no contienen carbono orgánico. Los constituyentes inorgánicos incluyen básicamente arena, arcilla y materia mineral en suspensión, metales y algunos otros elementos. La variedad de estos elementos presentes es muy grande, pero los principales elementos que sirven como micro nutrientes en el metabolismo de los organismos vivos son el carbono inorgánico, el nitrógeno, el fósforo y algunos otros elementos (Zayas, 2003).

c) Metales pesados: la presencia en los lodos de grandes cantidades de metales pesados como zinc (Zn), cobre (Cu) o níquel (Ni) causa toxicidad en los suelos y el cadmio (Cd) provoca absorción y acumulación en tejidos animales y vegetales.

d) Parámetros orgánicos: los compuestos orgánicos son aquellos que contienen el elemento carbono en combinación con uno o más diferentes elementos. La variedad e infinitas posibilidades de combinación de varios elementos con el carbono dan como resultado el que a la fecha se hayan identificado más de 2 millones de compuestos orgánicos diferentes y el

número de estos aumente cada día. La materia orgánica en los lodos es generalmente de origen animal o vegetal, así como de microorganismos y sus productos de desecho. Se encuentran presentes también fibras de origen vegetal, grasas, aceites, almidones, ligninas, etc. (Moeller *et al.*, 2005).

### 1.2.3 Características biológicas

a) Microorganismos indicadores: los coliformes totales y coliformes fecales son considerados organismos indicadores del grado de contaminación biológica presente en las aguas, lodos residuales y otros productos. El término coliforme total se refiere generalmente a los géneros *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter* y *Klebsiella*. Todos ellos excepto *Escherichia* pueden existir como saprófitos de vida libre y además estar en el intestino de los organismos (Zayas, 2003). La Tabla 1.1 nos muestra el nivel de densidad de coliformes fecales y totales que pueden hallarse en los diferentes tipos de lodos de una planta de tratamiento de lodos activados.

### b) Microorganismos patógenos

Las características biológicas de más interés en el estudio de los lodos son 2: la taxonomía o clasificación de los diferentes tipos de microorganismos y la presencia de microorganismos patógenos. En los lodos primarios existe una gran variedad de microorganismos, cuyo origen es intestinal o de otras fuentes. En los lodos secundarios, los tipos de microorganismos presentes dependen totalmente del substrato alimentado y de las condiciones ambientales. En los lodos mezclados se pueden encontrar una mezcla de microorganismos presentes tanto en lodos primarios y secundarios y su cantidad y diversidad depende del grado de estabilización alcanzado (Moeller *et al.*, 2005).

**Tabla 1.1** Niveles de densidad de microorganismos indicadores en diferentes tipos de lodos (Metcalf & Eddy, 2000).

Tipo de lodo	Coliformes totales (NMP/100mL)	Coliformes fecales (NMP/100mL)
Primarios	$1.2 \times 10^8$	$2.0 \times 10^7$
Secundarios	$7.0 \times 10^8$	$8.3 \times 10^6$
Mezclados*	$1.1 \times 10^9$	$1.1 \times 10^5$

\* Lodos mezclados se refiere a una práctica común en las plantas de tratamiento de enviar los lodos primarios y secundarios a un mismo tanque digester biológico aerobio o anaerobio para someterlos a un mismo proceso de estabilización.

Los patógenos representan un riesgo a la salud humana si se encuentran presentes en los lodos residuales. Si los lodos son mal manejados, por ejemplo cuando son depositados en tiraderos, los lixiviados conteniendo los microorganismos patógenos pueden alcanzar los mantos freáticos y contaminarlos. Otra forma de contaminación es a través de escurrimientos que alcanzan cuerpos receptores de donde se abastece de agua a poblaciones pequeñas. Cuando el lodo es aplicado a suelo agrícola existe el riesgo potencial de que permanezcan adheridos en algunos tejidos vegetales y que sean consumidos crudos (Zayas, 2003).

Existen cuatro grupos básicos de patógenos: Virus, Bacterias, Protozoarios y Helmintos.

### **1.3 Composición de los lodos residuales**

La composición y contenido de los sólidos de los lodos está en función de las características de las aguas residuales crudas y del proceso de tratamiento que los genera. Los lodos crudos de ambos tipos están compuestos principalmente de agua y un porcentaje de sólidos menor (de 0.5% a 5%) dependiendo del origen de los mismos y del método de remoción (FUJITA, 2004). Los lodos que se generan en las plantas de tratamiento son fácilmente putrescibles lo que rápidamente genera gran cantidad de olores desagradables convirtiéndose así, en un problema de salud.

#### a) características contaminantes del lodo

Las características dañinas del lodo es la presencia de contaminantes como organismos indicadores (coliformes fecales), patógenos (*Salmonella spp.*) y parásitos (huevos de helminto). Otros contaminantes que limitan el uso del lodo son los tóxicos inorgánicos que son elementos que en grandes concentraciones pueden causar problemas de toxicidad en cultivos y penetrar en la cadena alimenticia provocando problemas de salud. Contaminantes como tóxicos orgánicos también están presentes sobre todo donde hay descargas industriales. Otras características como la conductividad eléctrica (indicador de la concentración de sales) pueden ser limitantes para el uso o disposición ya que hay cultivos agrícolas sensibles a altas concentraciones de sales y por lo tanto pueden provocar contaminación en los suelos donde se dispongan (Moeller *et al.*, 2005). En la Tabla 1.2 se observan los Límites Máximos Permisibles de contaminación biológica según la NOM-004-SEMARNAT-2002.

**Tabla 1.2** Límites Máximos Permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2000).

CLASE	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de Helmintos N°Huevos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables.

### b) Características benéficas del lodo

El lodo tiene un alto contenido de materia orgánica (29.5-60.4%), esto va a representar uno de los aportes benéficos más apreciables del uso de los lodos residuales en los suelos agrícolas. La materia orgánica va a contrarrestar los efectos nocivos de la salinidad, va a incrementar la actividad de los microorganismos nativos del suelo, lo que va a inducir a una correcta mineralización de los nutrientes del lodo que van a quedar disponibles a los cultivos. Además, van a mejorar algunas características físicas de los suelos como es la retención del agua (Moeller *et al.*, 2005).

Los macronutrientes son los que necesitan los cultivos agrícolas en mayores cantidades, como nitrógeno, fósforo y potasio; van a estar principalmente en formas orgánicas o sea que su disponibilidad es baja, por lo que se va a necesitar adicionar fertilizantes comerciales, pero la ventaja es que van a estar disponibles en varios ciclos agrícolas. Los micronutrientes son elementos esenciales en las actividades metabólicas de las plantas y son requeridos en pequeñas cantidades, si se encuentran en concentraciones elevadas, pueden pasar a través de la cadena alimenticia o bien pueden provocar toxicidad a las plantas (Moeller *et al.*, 2005).

En la Tabla 1.3 se compara la concentración de nutrientes de un fertilizante comercial y la concentración presente en un biosólido, como se puede observar son menores en este último.

**Tabla 1.3** Concentraciones típicas de elementos en un lodo estabilizado y fertilizante comercial (Metcalf & Eddy, 2000)

Producto	Nutrientes %		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizantes comerciales	5	10	10
Lodos biológicos estabilizados	3.3	2.3	0.3

## 1.4 Principales métodos de tratamiento de lodos

Los principales métodos que se emplean, hoy en día para el tratamiento y disposición de lodos, se especifican en la Tabla 1.4

**Tabla 1.4** Métodos de tratamiento y evacuación de lodos (Metcalf & Eddy, 2000)

Proceso o evacuación	Operación unitaria, proceso unitario o método de tratamiento
Operaciones preliminares	Bombeo de fangos
	Trituración de fangos
	Almacenamiento y homogeneización de fangos
Espesamiento	Desarenado de fangos
	Espesamiento por gravedad
	Espesamiento por flotación
	Centrifugación
	Espesamiento con filtros de banda
Estabilización	Espesamiento con tambor giratorio
	Estabilización con cal
	Tratamiento térmico
	Digestión anaerobia
Acondicionamiento	Digestión aerobia
	Compostaje
	Acondicionamiento químico
Desinfección	Acondicionamiento térmico
	Pasteurización
Deshidratación	Almacenamiento durante largos períodos de tiempo
	Filtro de vacío
	Centrífuga
	Filtro banda
	Filtro prensa
	Eras de secado
Secado térmico	Lagunaje
	Variantes de hornos de secado
Reducción térmica	Evaporador de efecto múltiple
	Incinerador de pisos
	Incinerador de lecho fluidificado
	Incineración conjunta con residuos sólidos
	Oxidación por vía húmeda
Evacuación final	Reactor vertical profundo
	Evacuación al terreno
	Distribución y comercialización
	Vertedero controlado
	Lagunaje
	Fijación química

## **1.5 Marco Jurídico de regulación**

En México, las leyes fundamentales vigentes que rigen la disposición de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales son: La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), que entró en vigor el 1° de marzo de 1988; el Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de noviembre de 1988; La Ley de Aguas Nacionales (LAN), publicada en el DOF el 1° de diciembre de 1992; el Reglamento de la LAN publicado en el DOF el 12 de enero de 1994 y la nueva Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 publicada en el DOF el 23 de junio de 2006 que establece que los lodos y biosólidos estarán regulados por la NOM-004-SEMARNAT-2002. Con respecto al impacto ambiental no existía hasta el año 2003 una reglamentación específica al manejo de lodos hasta que entraron en vigor las siguientes:

1.- NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Se publicó en el DOF el día 15 de agosto de 2003 y entró en vigor a los 60 días posteriores de su publicación.

2.- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Fue publicada en el DOF el día 8 de octubre de 2003 y entró en vigor a los 90 días posteriores de su publicación. Esta Ley clasifica en su Artículo 19 como residuos de manejo especial a los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

## 1.6 Descripción de los procesos productivos aplicados en la Planta “Primer Centenario”

Los procesos de tratamiento aplicados en la Planta Primer Centenario pueden ser separados en 2 grandes grupos: Procesos de tratamiento de agua residual y Procesos de tratamiento de Lodos, los cuales pueden ser a su vez subdivididos en Operaciones físicas unitarias, Procesos biológicos unitarios y Procesos químicos unitarios. La figura 1.2 esquematiza los diferentes módulos de tratamiento que componen tanto los Procesos de tratamiento de agua residual y de lodos producidos en la Planta Primer Centenario. Para el cumplimiento de las funciones de la Planta, se cuenta con una plantilla de 13 personas (CAPA, 2005).

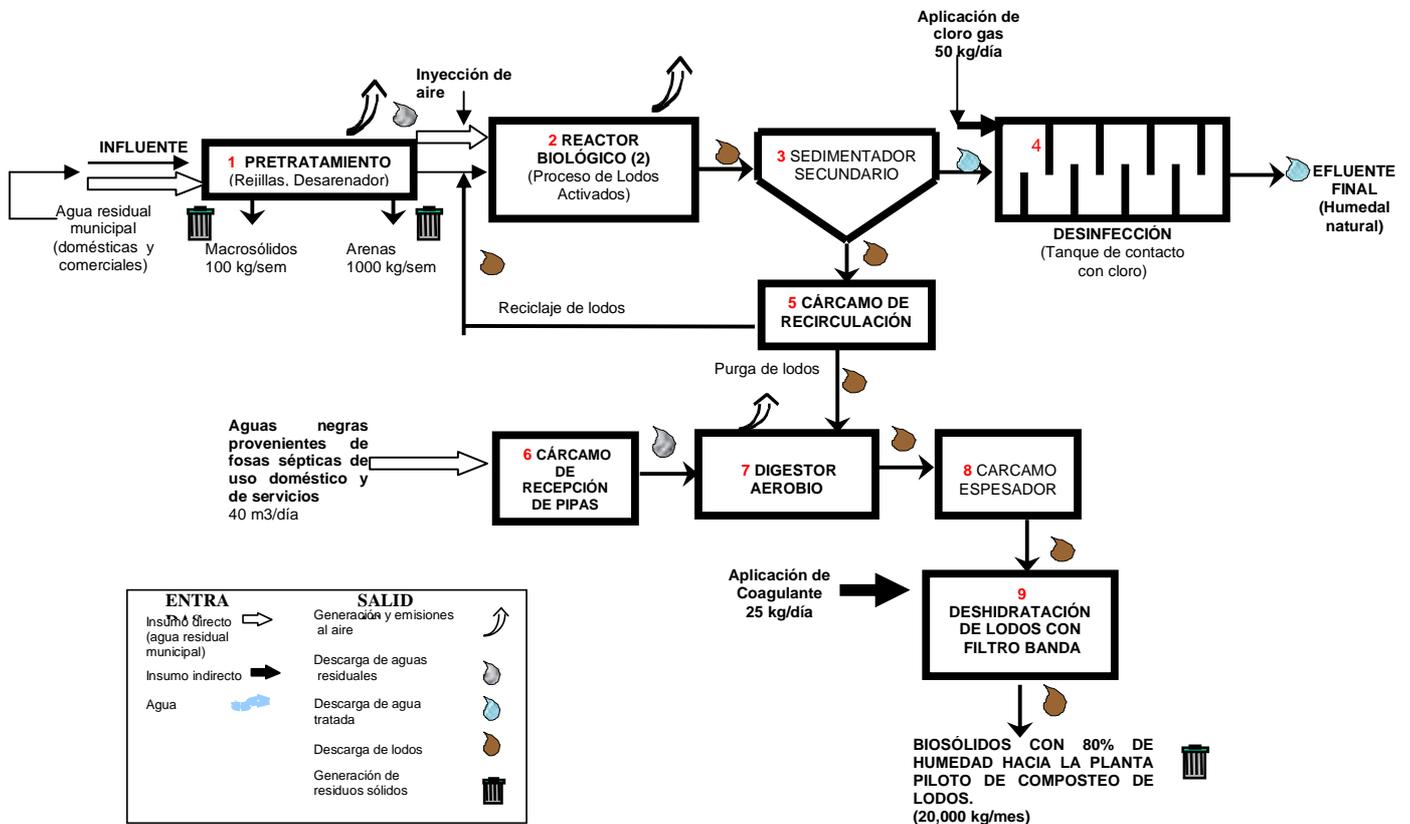


Figura 1.2 Diagrama de procesos aplicados en la Planta “Primer Centenario” (CAPA,2005).

## **1.6.1 Procesos de tratamiento de agua residual**

### **1.6.1.1 Operaciones físicas unitarias (Pretratamiento):**

El pretratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes físicos cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares.

Este es el primer módulo a que se somete el agua residual doméstica que recibe la Planta Centenario, el cual consta de los siguientes elementos:

*Medidor de flujo:* mide el caudal del influente para tener un mejor control y seguimiento de los procesos y para los informes de descargas.

*Rejillas:* se utilizan para proteger las bombas, válvulas, conductos y otros elementos contra los posibles daños y obturaciones provocados por la presencia de residuos sólidos y objetos de gran tamaño. Las rejillas en la Planta Centenario son de operación manual.

*Cribas:* es muy importante apoyar la función de las rejillas con cribas debido a que el agua residual acarrea elementos que pueden atravesar las rejillas (por ejemplo: tapas de refrescos, preservativos, bolsas pequeñas, etc.), los cuales provocan una imagen antiestética en los tanques ya que prevalecen flotando en la superficie del agua. Las cribas tienen por lo general distancias de separación menores que las rejillas.

*Desarenador:* en este proceso se lleva a cabo la deposición de partículas discretas o arenas, cuyo peso específico es mayor que el del agua, donde éstas mantienen una velocidad de sedimentación constante y no cambian de forma y tamaño. La planta de tratamiento Primer Centenario cuenta con tres desarenadores, lo cual permite alternar su uso al darles mantenimiento.

*Tanque homogeneizador:* este es el último proceso físico que se lleva a cabo en el pretratamiento y se caracteriza por ser de nivel variable debido a que el influente de la Planta de tratamiento es por flujo intermitente, condicionado por los tiempos de rebombeo de los cárcamos que lo alimentan y además que en este tanque llega también el caudal de recirculación para mezclarse con el influente ya pretratado.

### **1.6.1.2 Procesos biológicos unitarios**

*Reactores biológicos:* en los reactores biológicos se lleva a cabo el tratamiento biológico secundario de las aguas residuales, donde el agua residual urbana se somete a aireación durante un período de tiempo y se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculento. El examen microscópico de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variables de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. Los microorganismos presentes son bacterias, hongos, algas, protozoos y rotíferos. De estos, las bacterias son probablemente las más importantes, encontrándose en todos los tipos de procesos de tratamiento biológico.

*Tanque sedimentador secundario:* se conoce también con el nombre de clarificador secundario, se encuentra a continuación del reactor biológico. En él, el lodo del reactor biológico se separa del efluente tratado con el objetivo de obtener un efluente clarificado, cumpliéndose de esta manera el proceso de sedimentación zonal. Se considera que un tanque sedimentador tiene una eficiencia del 100% si el efluente clarificado tiene una presencia nula de SSV (sólidos suspendidos volátiles).

*Cárcamo de recirculación:* este tanque sirve como depósito de los lodos separados en el Tanque Sedimentador. Un porcentaje de estos se desechan del proceso de tratamiento de agua (purga) y otro porcentaje mayor se recicla para mantener un nivel determinado de lodos en el Reactor Biológico. En la operación de purga es muy importante conocer el caudal de lodos eliminados del sistema, para los informes de descarga y para tener un control en el proceso de tratamiento de lodos.

### **1.6.1.3 Procesos químicos unitarios**

*Tanque de contacto con cloro:* en este tanque se lleva a cabo la última fase de tratamiento del agua residual y consiste en utilizar el cloro gas ( $\text{Cl}_2$ ) como agente químico desinfectante antes de descargar el efluente final al cuerpo receptor. La cloración es el método aplicado para la destrucción de los organismos patógenos y otros organismos perjudiciales que puedan poner

en peligro la salud humana, pero tiene el inconveniente de ser la más peligrosa en su operación.

### **1.6.2 Procesos de tratamiento de lodos**

*Digestor aerobio:* el excedente de licor mezclado (lodos biológicos en el interior del reactor biológico) que es desechado del sistema de tratamiento de agua se conoce como purga de lodos; esta actividad se realiza enviando lodos excedentes desde el cárcamo de recirculación hacia el digestor aerobio. Esta actividad se realiza con una periodicidad de cada tres días en el que es desechado en una ocasión aproximadamente 100 m<sup>3</sup> de lodo secundario con un 99% de humedad.

Las aguas y lodos residuales provenientes de fosas sépticas, restaurantes, hoteles, supermercados y de servicios, que llegan a la Planta mediante pipas, son también inducidas en el digestor aerobio para cumplir con todo el ciclo del procesos de tratamiento.

Dentro del digestor aerobio se presentan condiciones donde existe una gran concentración de oxígeno residual y muy baja cantidad de materia orgánica puesto que los lodos que recibe ya se encuentran en su última fase de oxidación; bajo estas condiciones y favorecidos por los altos tiempos de retención hidráulica (TRH) dentro del digestor se permite la respiración endógena (canibalismo) entre los microorganismos ahí presentes, lo que origina la mortandad de los mismos obteniendo así, la estabilización de los lodos hasta hacerlos inertes.

*Cárcamo separador de lodos:* los lodos inertes obtenidos mediante digestión aerobia son conducidos hasta el cárcamo separador de lodos con el objetivo de iniciar su fase de deshidratación hasta un 90% de humedad y así hacer más fácil su manejo. Esto se logra mediante el proceso natural de sedimentación ya que este cárcamo tiene un fondo cónico.

*Filtro banda:* el lodo obtenido del cárcamo separador de lodos se hace pasar al filtro banda, pero antes, les es aplicado un coagulante químico de alto peso molecular y media carga catiónica de nombre comercial POLY+CAT-C5450-2 (el Anexo I presenta la hoja de seguridad del producto), con la finalidad de aglutinar los sólidos hasta formar flóculos grandes

y liberando el agua contenida; estos flóculos ya formados son conducidos al filtro banda donde los flóculos se comprimen hasta obtener un 77.5% de humedad en los mismos.

La dosificación aplicada de coagulante es de una solución preparada con 12 kilogramos de polímero en 1,000 litros de agua que nos permitirá operar el filtro banda durante un turno de 8 horas y obtener aproximadamente 3,000 Kg. de biosólidos con una alta calidad de sequedad (20%).

## **1.7 Composteo de lodos residuales**

### **1.7.1 Bases teóricas del proceso de composteo.**

El composteo es un proceso biológico para la estabilización de los lodos donde se realiza una degradación aerobia por bacterias y hongos a una temperatura termofílica, en una mezcla de lodo deshidratado y material acondicionador. Este proceso provee una destrucción significativa de patógenos a temperaturas de 40°C durante 5 días consecutivos o también puede alcanzar una destrucción adicional de patógenos a temperaturas de 55°C durante 3 días consecutivos de acuerdo a lo establecido en el Apéndice B de la Norma 503 de la EPA, 1993, (Zayas, 2003). El resultado del proceso de composteo es un sustrato que puede ser utilizado como fertilizante o acondicionador de suelos.

#### **1.7.1.1 Etapas de composteo**

El proceso de composteo consta básicamente de 4 etapas (Moeller *et al.*, 2005).

Mezclado: es la primera etapa del proceso y consiste en obtener una mezcla homogénea al revolver el material acondicionador con el lodo. La mezcla final debe tener una porosidad de 30 a 35% (espacios libres) y una humedad inferior al 60%. El mezclado se puede realizar por medio de diferentes mezcladores estáticos que existen en el mercado o con ayuda de un cargador frontal.

Estabilización termofílica: la etapa termofílica tiene lugar después del mezclado y requiere de tres o cuatro semanas para completarse. Durante este período la mezcla debe tener aeración

manual o forzada con el fin de proporcionar el oxígeno necesario para que los microorganismos realicen la biodegradación y se generen altas temperaturas (50-55°C) necesarias para la destrucción de microorganismos patógenos; es la etapa de alta actividad microbiana caracterizada por la presencia de microorganismos termofílicos y alta reducción de sólidos volátiles biodegradables (Moeller *et al.*, 2005).

Curado o estabilización final: se realiza después de la estabilización termofílica y su duración es de aproximadamente 30 días. Esta etapa se caracteriza por bajas temperaturas, menores requerimientos de oxígeno y baja producción de olores. Es una etapa muy importante donde se puede lograr la degradación adicional de compuestos difícilmente biodegradables (Moeller *et al.*, 2005).

Secado y cribado: tanto el secado como el cribado son etapas opcionales en el proceso de composteo, tienen como propósito la obtención de un material de mejor calidad. El cribado permite una mejor recuperación del material acondicionador que puede reciclarse al proceso y un producto de tamaño homogéneo dependiendo del uso que quiera darse a la composta (Moeller *et al.*, 2005).

#### **1.7.1.2 Factores que influyen en el proceso de composteo.**

Los principales objetivos del composteo son el control de microorganismos patógenos y la remoción de sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas, sin embargo, el funcionamiento adecuado del proceso depende de las siguientes variables:

Contenido de humedad o sólidos en la mezcla lodo-material acondicionador: la mezcla lodo-material acondicionador deberá tener un nivel de humedad no mayor del 60%, especialmente en el composteo en pila estática (Moeller *et al.*, 2005). Las condiciones óptimas de humedad se encuentran entre los porcentajes de 40 al 60 %, valores menores a 40 limitan la tasa de descomposición óptima ya que inhiben el crecimiento bacteriano y los valores mayores de 60% dificultan la aireación, producen malos olores por anaerobiosis y presentan integridad estructural inadecuada de la composta (Zayas, 2003).

Relación carbono-nitrógeno (C:N): el composteo se realiza con relaciones C:N bajas pero durante el proceso hay pérdidas de nitrógeno por volatilización perdiéndose uno de los nutrientes principales. La relación recomendada para el composteo es de 30:1 o 40:1. Una alta relación 50:1 puede provocar un entorpecimiento del proceso porque no hay suficiente cantidad de nitrógeno lo que imposibilita sostener la masa microbiana. El lodo residual generalmente tiene una relación C:N de más o menos 15:1 (Zayas, 2003).

Aeración y oxígeno: uno de los factores que afectan el composteo es el oxígeno disponible para los microorganismos que están realizando el trabajo de descomposición. Un contenido insuficiente de oxígeno provoca condiciones anaerobias y una estabilización incompleta de los materiales orgánicos generando problemas de olor y de manejo de la composta (Zayas, 2003).

El oxígeno usado para la degradación de la materia orgánica durante el composteo es sólo del 5 al 15% del requerido por el proceso para elevar la temperatura y evaporar el agua en exceso. Esta cantidad de oxígeno puede ser proporcionada mediante equipos de aireación tales como ventiladores centrífugos de baja presión. Se ha demostrado que la distribución de la temperatura en la pila es más uniforme con la aireación intermitente que con la continua (Zayas, 2003).

Potencial de hidrógeno (pH): el pH del lodo que va a ser composteado debe estar en un rango de 6 a 8, debido a que la mayor parte de los microorganismos tienen una actividad y crecimiento máximo dentro de este rango. Los pH's extremos de 5 o de 11 lo retardan durante algunos días, debido a que existe una tendencia a la estabilización a pH neutro (Zayas, 2003).

Temperatura: el proceso de desarrollo y crecimiento de las poblaciones de microorganismos que efectúan la degradación de la materia orgánica depende de las reacciones químicas y la velocidad con que se efectúan éstas, las cuales se ven influidas por la temperatura. La alta temperatura combinada con un alto grado de humedad es uno de los métodos más efectivos para destruir microorganismos (Zayas, 2003).

El calor húmedo mata a los microorganismos porque coagula sus proteínas y es más rápido y efectivo que el calor seco, que los destruye al oxidar sus constituyentes químicos. El calor proviene de las actividades metabólicas de los microorganismos al degradar el componente orgánico, supuestamente la enzima ATPasa es la principal responsable del calor producido (Zayas, 2003).

En la etapa inicial se registran temperaturas entre 25 y 40°C y predominan los microorganismos mesofílicos. En la etapa termofílica, donde hay una mayor remoción de patógenos, se encuentran poblaciones de actinomicetos y bacterias termofílicas. Las temperaturas si no se controlan pueden llegar hasta 80°C, sin embargo la temperatura no debe elevarse hasta este punto, y hay que mantenerla controlada por medio de ventilación en un rango de 45 a 55°C (Moeller *et al.*, 2005).

Material acondicionador: debido a que el lodo sólo es parcialmente desaguado, el contenido de humedad es de 75 a 83% por lo que es necesario incrementar su contenido de sólidos adicionando un material acondicionador que además ayude a proporcionar la estructura, porosidad y textura necesarias para permitir las condiciones aerobias. Las partículas de material acondicionador necesitan tener dureza y capacidad de adsorber humedad. Se requiere de un material acondicionador que proporcione suficiente carbono para aumentar la relación carbono : nitrógeno (C:N). La mezcla lodo/material acondicionador debe tener 50 a 60% de humedad (Zayas, 2003).

Además de estos requisitos básicos se debe tomar en cuenta la disponibilidad y el costo del material acondicionador. Se debe enfocar la atención sobre todo en aquellos desechos agroindustriales que se producen en grandes volúmenes como pedacería de madera, bagazo de caña, cascarilla de arroz, basura orgánica, etc. Otros materiales pueden considerarse como una fuente estacional de material por ejemplo, algunos desperdicios de la cosecha como elote, rastrojo, etcétera (Zayas, 2003).

### **1.7.2. Clasificación de los sistemas de composteo.**

Composteo en camellón: el composteo en camellón consiste en hacer un montículo de lodo desaguado y material acondicionador y colocarlo formando una hilera. Las dimensiones del camellón son aproximadamente de 15 m de largo, 4.5 m de ancho y 1.5 m de altura. El aire se suministra al sistema por volteo diario del camellón durante un período de 3 a 4 semanas (CONAGUA, 2007).

Las ventajas de este sistema son: proporciona un rápido secado de la mezcla facilitando la separación del material acondicionador. Es ideal para manejar pequeñas cantidades de lodo. La inversión inicial consiste en un cargador frontal y vehículo para el transporte de los materiales. Las desventajas son: mayores requerimientos de área que los procesos de pila estática y reactor, requiere mayor control del proceso para asegurar una buena ventilación y elevar la temperatura al rango termofílico (CONAGUA, 2007).

Composteo en pila estática: en este sistema la aeración es forzada. El aire es proporcionado por un soplador y se conduce por medio de un difusor hacia la mezcla (CONAGUA, 2007).

Las ventajas que ofrece este sistema son: la aeración es controlada y proporcionada por un sistema de ventilación sin remover el material. Menores requerimientos de área que el sistema de camellón. Control total del proceso por medio de sistemas manuales o automáticos. Bajos costos de capital. La inversión inicial consiste en equipo de mezclado (opcional), una superficie impermeable, sopladores, un sistema de difusión y un cargador frontal para el manejo de materiales (CONAGUA, 2007).

Composteo en reactor: en este sistema el proceso se realiza en condiciones cerradas y las condiciones del proceso pueden ser completamente controladas. Los reactores se construyen en forma rectangular o circular con aeración forzada y pueden ser de lecho fijo o móvil para mantener un sistema de agitación constante. Las ventajas de los reactores son: menores requerimientos de área, mayor control del proceso al no haber influencia de cambios meteorológicos y un control efectivo de olor. La principal desventaja reside en los altos costos de inversión inicial, operación y mantenimiento (CONAGUA, 2007).

## **1.8 Antecedentes**

Las experiencias de producción de composta en México iniciaron a principios de la década 1970 con la construcción de las primeras plantas de compostaje en el centro del país. Un estudio piloto del Instituto Nacional de Ecología (INE) realizado en el año 2005, identificó 61 plantas de compostaje en todo el territorio nacional que en su mayor parte son operadas por organismos públicos municipales con el objetivo de reducir, reciclar y re usar los residuos sólidos urbanos producidos (INE, 2005).

En el caso de plantas de composta que utilizan lodos de plantas de tratamiento de aguas, sólo se identificaron 2 casos: las pruebas de composteo de lodos residuales aplicados con éxito en la planta de tratamiento municipal de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos (utilizando bagazo de caña) y en la Planta de composteo del FONATUR de la Ciudad de Cancún, Quintana Roo (utilizando material vegetal de poda). Sin embargo las técnicas aplicadas han sido únicamente de manera empírica ya que no se cuenta con los estudios de evaluación correspondientes (INE, 2005).

En diversos estudios de investigación se ha demostrado que el proceso de composteo es un método controlado de transformación de materia orgánica, que estabiliza y sana los lodos para ser utilizados como acondicionadores de suelos en la agricultura. La idea de considerar al lodo como un desecho ha sido gradualmente abandonado en muchos países, actualmente se ha cambiado el manejo del lodo hacia una filosofía del aprovechamiento, considerándolo no como un residuo sino como una fuente de recursos principalmente nutrientes para el suelo y vegetales con un aprovechamiento ilimitado en la agricultura (Cardoso, 2000).

Los lodos generados en las plantas de tratamiento operadas por la CAPA, fueron estudiados previamente por un laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) en el año 2005 (CAPA, 2005) y los resultados dados a conocer, demostraron que eran inocuos a la salud humana al no contener sustancias tóxicas y cumplir con las características de Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico Infecciosas (CRETIB), para ser considerados residuos no peligrosos de acuerdo a la NOM-052-SEMARNAT-2005. La carga microbiana no era significativa, por lo que se pensó que eran

excelentes candidatos para ser reutilizados para fines de agricultura o como mejorador de suelos (CAPA, 2005).

Sin embargo, al igual que en todo el Estado, la producción y disposición final actual de estos lodos en la Planta “Primer Centenario”, se realiza de manera no controlada, ya que no se cuenta con las instalaciones adecuadas ni con un Programa de manejo, reuso y disposición final de estos subproductos. Los lodos se disponen directamente en los patios traseros de la Planta de tratamiento; en algunos casos se ha realizado su donación a la Dirección de Servicios Públicos Municipales y a particulares, acción que no ha tenido éxito debido a la putrefacción y los olores que presentan como resultado del manejo inadecuado.

## **1.9 Justificación**

En las actividades de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, así como en las correspondientes a la operación de las plantas potabilizadoras y de plantas de tratamiento de aguas residuales se generan volúmenes de lodos, que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Se ha considerado que los lodos por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas o, en su caso, se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos; para atenuar sus efectos contaminantes para el medio ambiente y proteger a la población en general (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En el Estado de Quintana Roo se producen diariamente en promedio 50 m<sup>3</sup> de lodos residuales deshidratados con un porcentaje de humedad que va de 60 a 80% en las principales plantas de tratamiento de aguas residuales de las ciudades de Chetumal, Playa del Carmen, Cozumel y Cancún. Dichas plantas son operadas por tres principales Organismos: la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), Desarrollos Hidráulicos de Cancún (AGUAKAN) y el Fondo Nacional de Turismo (FONATUR) (CAPA, 2005). Esta situación genera la problemática de la disposición final de los lodos y su manejo adecuado ya que no se tiene una metodología de uso definido.

El lodo residual municipal es una alternativa viable que ayudaría a mejorar las características físicas, químicas y biológicas de los suelos en el Estado de Quintana Roo, ya que por la naturaleza física de su formación (Luvisol órtico o Kankab de acuerdo a la clasificación maya), este no es muy apto para fines agrícolas por la poca profundidad de los horizontes de formación del suelo.

## **1.10 Objetivos**

La presente tesis persigue los siguientes objetivos:

- ✓ Diseñar una planta piloto de composteo de lodos residuales.
  
- ✓ Llevar a cabo la construcción de la Planta Piloto de composteo de lodos residuales en la planta de tratamiento de aguas residuales “Primer Centenario” de la ciudad de Chetumal.
  
- ✓ Evaluar el funcionamiento de la planta piloto de composta con la finalidad de medir su eficiencia alcanzada.

## **CAPITULO 2. Materiales y Métodos**

### **2.1 Área de estudio**

La ciudad de Chetumal (área de estudio), esta localizada en el sur del Estado de Quintana Roo, es la segunda zona urbana más poblada del mismo con 136,825 habitantes; se encuentra rodeada en parte por la selva mediana subperennifolia, la bahía de Chetumal (reserva natural protegida, santuario del Manatí) y la desembocadura del Río Hondo hacia el sur (INEGI, 2005).

La Planta de Tratamiento “Primer Centenario” se encuentra instalada en la ciudad de Chetumal, Estado de Quintana Roo y recibe su nombre por motivo de que su construcción coincidió con la fecha del cumplimiento del primer centenario de la fundación de la ciudad de Chetumal (antes Payo Obispo), se encuentra en funcionamiento desde marzo de 1999 y opera con el tipo de proceso de lodos activados en su modalidad de aireación extendida dando tratamiento diario a 6,912 m<sup>3</sup> (80 lps) de agua residual y produciendo 3.0 m<sup>3</sup>/día (aproximadamente) de lodos residuales en base seca con un 77.5% de humedad. Actualmente la Planta de Tratamiento esta operando de manera subutilizada ya que tiene una capacidad instalada para recibir 120 lts/seg. de agua residual, pero a razón de que la ciudad de Chetumal sólo cuenta con un 40% de cobertura de alcantarillado sanitario, sólo está operando a un 60% de su capacidad. Esta planta es operada por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado por medio del organismo Operador Othón P. Blanco (CAPA, 2005). La Figura 2.1 muestra la macro y micro localización de la Planta piloto de composta, la cual se encuentra dentro de las instalaciones de la Planta Primer Centenario.

## **2.2 Diseño de la Planta Piloto**

El método que se empleó para el diseño de la planta piloto se basó en los criterios básicos y procedimientos que presenta el libro: “Guía para el manejo, tratamiento, y disposición de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales, 2007 y el Manual “Curso teórico-práctico: Tratamiento de lodos residuales, 2003” que publicaron la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA) respectivamente.

Para el diseño de este sistema de composteo se consideraron los siguientes aspectos:

### **2.2.1 Criterios de planeación**

En la planeación del Proyecto se consideraron los siguientes puntos:

Caracterización del lodo: fue indispensable obtener primero una caracterización del lodo que se genera en la Planta “Primer Centenario” para determinar la cantidad de contaminantes como metales pesados, tóxicos orgánicos y organismos patógenos que podrían encontrarse en los lodos residuales producidos. Para esto, se tomaron de referencia los resultados del “Estudio para la Evaluación de la Calidad Analítica de los Lodos Producidos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado. Planta Primer Centenario” (CAPA, 2005); estudio que fue realizado con la finalidad de determinar sus características de Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico infeccioso (CRETIB), contenido de metales pesados, patógenos, parásitos y demás propiedades de acuerdo a las NOM-052-SEMARNAT-1993 (actualmente NOM-052-SEMARNAT-2005) y NOM-004-SEMARNAT-2002.

Selección de materiales acondicionadores: el lodo residual tiene una relación de carbono - nitrógeno (C/N) de aproximadamente 10:1, se requiere incrementar esta relación entre 30:1 y 40:1 debido a que los microorganismos utilizan 30 partes por peso de Carbono (C) por cada parte de nitrógeno (N) por lo que para ello se utiliza el material acondicionador, menos de 30:1 hay pérdidas de nitrógeno por volatilización del amoníaco, y más de 40:1 conducen a tiempos mayores de composteo (CONAGUA, 2007). Por sus características óptimas para el

composteo fueron seleccionados en este proyecto los agentes acondicionadores que se señalan en la Tabla 2.1. El material acondicionador se utilizó también para proporcionar estructura, textura y porosidad al lodo con el fin de facilitar la difusión de oxígeno y otros gases en la mezcla. Debido a la alta biodegradabilidad de algunos materiales utilizados como acondicionadores, éstos constituyen también una fuente de energía adicional durante el proceso (Zayas, 2003).

Los materiales acondicionadores fueron seleccionados además de los motivos ya señalados por su disponibilidad en la región en cualquier época del año, facilidad de transporte y sobre todo por sus bajos costos de adquisición. El bagazo de caña fue obtenido de los residuos que genera el Ingenio azucarero San Rafael de Pucté, los residuos de madera (aserrín) fueron obtenidos de las madererías de la ciudad y los residuos vegetales de las hojas y ramas producto de poda de jardinería de la misma planta de tratamiento.

Selección del sitio de composteo: los criterios aplicados en la selección del sitio de composteo fueron básicamente los siguientes:

- Disponibilidad de un área suficiente para realizar todas las operaciones de una manera económica sin provocar alteración en el ambiente y molestias a las poblaciones cercanas y a las actividades normales de la Planta de tratamiento.
- Tener facilidad en el transporte de lodos con la finalidad de reducir los costos por manejo y traslado.

**Tabla 2.1** Características de los materiales al inicio del ciclo de composteo (Zayas, 2003)

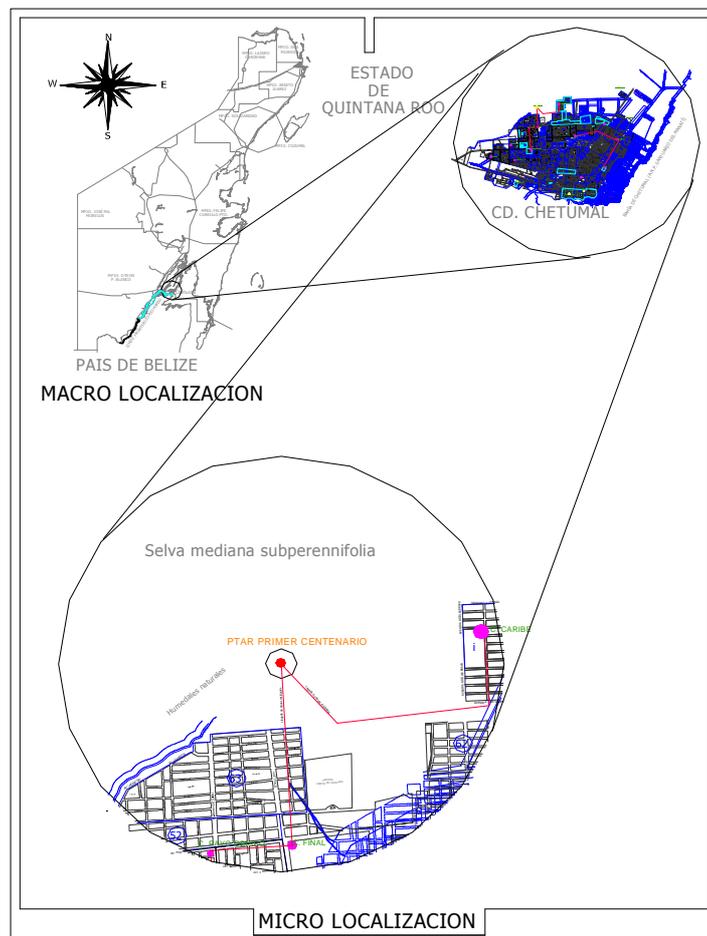
Material	Densidad <sup>1</sup> (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad <sup>2</sup> (Ton/m <sup>3</sup> )	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Biodegradabilidad BD (%)
Lodo fresco deshidratado con un 77.5% de humedad (Lodo)	829	0.95	20	74	50
Residuos vegetales productos de poda de jardinería (Poda)	186	0.50	50	50	40
Bagazo de caña (Bagazo)	208	0.32	55	81	60
Residuos de madera (Aserrín)	242	0.45	60	40	30

<sup>1</sup> obtenidos en el proyecto. <sup>2</sup> obtenidos por Zayas, 2003

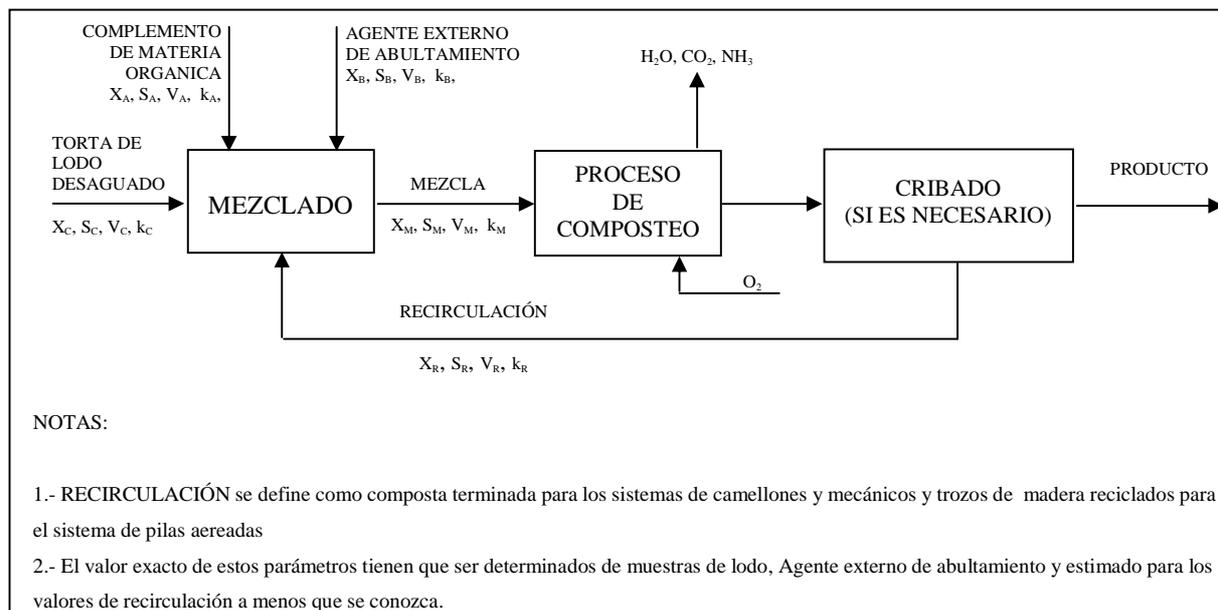
Por lo tanto, se decidió que el mejor sitio para construir la Planta Piloto de Composta debería ser dentro del mismo predio de la Planta Primer Centenario ubicado en la calle Tenacidad s/n esquina Prolongación Av. 4 de marzo en la colonia Nuevo Progreso. La Figura 2.1 presenta la micro y macro localización de la Planta “Primer Centenario” donde se realizaron las acciones.

### 2.2.2 Balance de masa y energía

El balance de masa y energía permite definir, en función de los materiales utilizados, la proporción en que éstos deben mezclarse con el lodo al inicio del proceso y también sus cambios cuantitativos en las diferentes etapas del proceso (Zayas, 2003). La Figura 2.2 muestra un diagrama generalizado de balance de materia para un proceso de composteo.



**Figura 2.1** Macro y micro localización de la Planta “Primer Centenario”



**Figura 2.2** Diagrama de balance de masa para el composteo de lodos (CONAGUA, 2007).

### Variables de proceso y ámbito de valores (entre paréntesis)

$X_C$ . Peso total húmedo de torta de lodo producido/día.

$X_A$ . Peso total húmedo de complemento de materia orgánica

$X_R$ . Peso total húmedo de recirculación/día.

$X_B$ . Peso total húmedo de agente externo de abultamiento

$X_M$ . Peso total húmedo de la mezcla/día.

$S_C$ . Contenido de sólidos en la torta del lodo (0.20 a 0.55)

$S_A$ . Contenido de sólidos en material orgánico (0.50 a 0.95).

$S_R$ . Contenido de sólidos de la recirculación (0.060 a 0.75)

$S_B$ . Contenido de sólidos del agente externo de abultamiento (0.50 a 0.85)

$S_M$ . Contenido de sólidos de la mezcla (0.40 a 0.50).

$V_R$ . Contenido de sólidos volátiles, fracción de sólidos secos (0.00 a 0.90)

$V_C$ . Contenido de sólidos volátiles en la torta de lodo, fracción de sólidos secos (0.40 a 0.60)- digerido, (0.60 a 0.50) – crudo.

$V_A$ . Contenido de sólidos volátiles del material orgánico, fracción de sólidos secos (0.80 a 0.95)

$V_B$ . Contenido de sólidos volátiles, agente externo de abultamiento, fracción de sólidos secos (0.55 a 0.90)

$V_M$ . Contenido de sólidos volátiles de la mezcla, fracción de sólidos secos (0.40 a 0.90)

$K_C$ . Fracción degradable de los sólidos volátiles de la torta de lodo bajo condiciones de composteo (0.33 a 0.56)

$K_A$ . Fracción degradable de los sólidos volátiles del material orgánico bajo condiciones de composteo (0.40 a 0.60)

$K_R$ . Fracción degradable de los sólidos volátiles de recirculación bajo condiciones de composteo (0.00 a 0.20)

$K_B$ . Fracción degradable de los sólidos volátiles del agente externo de abultamiento bajo condiciones de composteo (0.00 a 0.40)

$K_M$ . Fracción degradable de los sólidos volátiles de la mezcla bajo condiciones de composteo (0.20 a 0.60)

La corriente de reciclado puede consistir de composta terminada, agente de abultamiento o una combinación de ambas. Las cantidades exactas de las diferentes corrientes dependen de las ecuaciones de balance de masas siguientes derivadas de la Figura 2.2 y el tipo de proceso de composteo utilizado.

$$X_R = \frac{X_C (S_M - S_C) + X_A (S_M - S_A) + X_R (S_M - S_R)}{(S_R - S_M)}$$

$$W = \frac{X_C (1 - S_C) + X_A (1 - S_A) + X_R (1 - S_R) + X_R (1 - S_R)}{X_C S_C V_{Ck_C} + X_A S_A V_{Ak_A} + X_R S_R V_{Rk_R} + X_R S_R V_{Rk_R}}$$

La primera ecuación ( $X_R$ ) es utilizada para determinar la cantidad de composta o trozos de madera reciclados y la segunda ( $w$ ) es utilizada para determinar la relación  $W$  (masa de agua en la mezcla inicial de composta / masa de orgánicos degradados bajo condiciones de composteo).

Como resultado de las consideraciones anteriores, se decidió por un Proyecto de Planta piloto para el composteo de lodos mediante el sistema de pilas estáticas aeradas. El diseño de este sistema consiste de los siguientes pasos: 1.-mezclado de lodo con un agente acondicionador, 2.-construcción de la pila de composteo 3.-estabilización termofílica 4.-cribado de la mezcla composteada 5.-curado y 6.-almacenamiento. En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de flujo resultante que muestra el seguimiento de la producción de biosólidos a partir de lodos residuales.

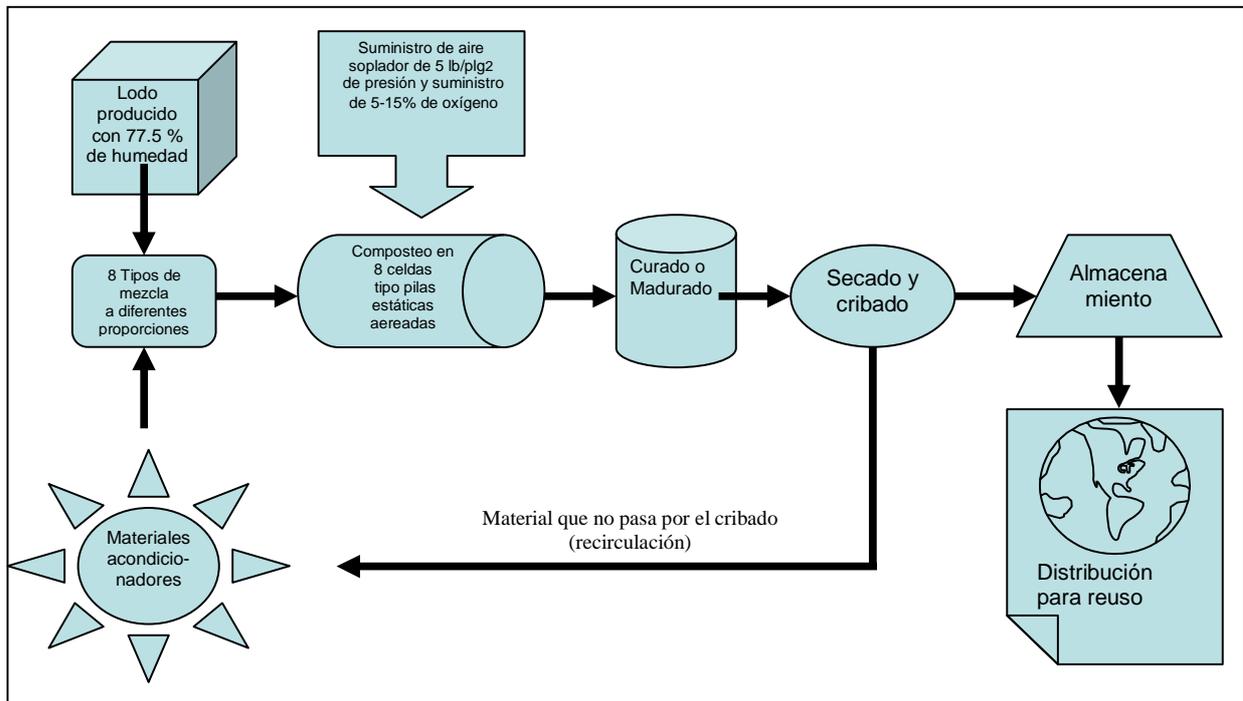


Figura 2.3 Diagrama de flujo de proceso-composteo de lodo en pilas estáticas aereadas

### 2.2.3 Dimensionamiento de las áreas.

El área total requerida para la planta piloto de composteo se estimó de la siguiente manera:

**Área de mezclado.** Debido a que la producción deseada de composta es de apenas 0.26 ton/día (8 ton/mes), para el área de mezclado puede usarse un área de igual tamaño que la de composteo (Zayas, 2003).

El mezclado se planeó para realizarse de manera manual por un operador.

**Área de composteo.** Se consideró destinar un área suficiente para acomodar en pilas la producción de 30 días, el equipo de aeración y además permitir los movimientos de volteo manual.

El cálculo del área de composteo se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Área} = \frac{(1.1)(\text{vol. de lodo de 30días})(R+1)}{\text{altura promedio de la pila}}$$

Donde:

$$R = \frac{\text{Volumen de material acondicionado}}{\text{Volumen del lodo}}$$

Del total resultante se adicionó un 10% para maniobras

El área de Composteo resultante fue igual a 80 m<sup>2</sup>.

**Área de curado.** Para el proceso de curado se consideró que su duración debería ser igual a 30 días. Los cálculos deberían ser los mismos que para el composteo; sin embargo, por razones de presupuesto y suponiendo un flujo continuo en la producción y la demanda, se optó por construir una galería de almacenamiento de 32 m<sup>2</sup> que hiciera al mismo tiempo las funciones de curado, cribado y almacenamiento temporal de los productos terminados.

**Área de cribado.** Como se mencionó anteriormente está contemplada dentro de la galería de almacenamiento. Se consideró realizar el cribado de manera manual mediante una criba con espacios de separación de 0.5 centímetros y los materiales que no pasen la malla serán reciclados al nuevo ciclo de composteo.

A manera de resumen se obtuvo Proyecto con una superficie total de 232.00 m<sup>2</sup> dividido en las siguientes áreas:

de mezclado 80 m<sup>2</sup>

de composteo 80 m<sup>2</sup>

de curado, cribado y almacenamiento: 32 m<sup>2</sup>

de 2 casetas para instalación de equipo soplador y trituradora 18 m<sup>2</sup>, y

de áreas de camino por 22 m<sup>2</sup>

## **2.3 En la construcción de la Planta Piloto**

La construcción de la planta piloto de composteo se realizó a un costado de los módulos de tratamiento de lodos de la planta “Primer Centenario” conforme a las siguientes tres subetapas.

### **2.3.1 Gestión de recursos**

Una vez concluida la planificación, se procedió a la fase de gestión de los recursos para materializar las instalaciones que nos permitieron cumplir con los objetivos planteados. Para esto, fue necesaria la firma de un Convenio de Colaboración entre la CAPA y el ECOSUR, en el cual se formalizaron los compromisos de aportación al Proyecto por ambas partes con un 50% de participación económica para cada Institución. En el Anexo N° III se encuentra una copia de este Convenio.

### **2.3.2 Proceso de contratación de la obra**

Esta fase del proyecto fue muy lenta por razón de trámites burocráticos y administrativos que se presentaron por parte del personal encargado de ambas instituciones. Al final, se llevó a cabo el proceso de contratación mediante invitación restringida a 3 contratistas locales interesados en realizar la obra. Una vez concluido el procedimiento, la construcción de la obra fue adjudicada a la Compañía PRADO Construcciones S.A. de C.V. En el Anexo N° IV se encuentra una copia del contrato correspondiente que se celebró con esta empresa.

### **2.3.3 Construcción y supervisión de obra.**

El proceso de construcción de la obra vino acompañado de una supervisión continua para verificar se cumplieran con todas las especificaciones solicitadas en el contrato correspondiente y las especificaciones del Proyecto. En esta fase también se llevó a cabo la instalación de los equipos: trituradora de ramas y soplador por parte del personal de la CAPA. Las Figuras 2.4 y 2.5 permiten observar dos imágenes de la etapa de construcción de la Planta piloto de composta.



**Figuras 2.4 y 2.5** Preparación del sitio e inicio de las obras de construcción

### **2.3.3.1 Sistemas de ventilación y trituración**

La aeración es el mecanismo más importante para el control del proceso de composteo. El sistema seleccionado fue un soplador de tipo lóbulos accionado por un motor de 7.5 H.P.; este equipo se conectó a una red de tubos perforados que hacen la función de sistema de difusión de aire hacia 8 parrillas que harán la función de pilas aireadas de composteo.

Las perforaciones del sistema de difusión de aire se realizaron con una broca de 1/16 avo de pulgada, para obtener un flujo de aire de 3,500 pies cúbicos/hora/ton de lodo seco y una velocidad de 1500 pies/min. Con esto, se pensó en satisfacer las necesidades de aireación durante el proceso, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante (Figura 2.6).

Con respecto al sistema de trituración, se instaló una trituradora tipo martillo con cribado fino y grueso con capacidad de picar 300 kg/hora de materia vegetal ya sea seco o en verde (Figura 2.7).



**Figuras 2.6** Sistema de ventilación



**Figura 2.7** Sistema de trituración

### 2.3.4 Costos de inversión

Junto con el proceso de construcción de la obra fueron suministrados los equipos y materiales relacionados en la Tabla 2.2 para su uso en la planta piloto de composteo:

**Tabla 2.2** Costos de la inversión realizada por construcción y suministro de equipos para la Planta piloto de composteo.

N° de Suministro	Concepto	Cantidad	Unidad	Precio Total (IVA incluido)
1	Construcción 200 m <sup>2</sup> de plataforma de composteo, 2 casetas y sistema de red de difusores.	Lote	1	<b>\$70,000.00</b>
2	Suministro e instalación de Soplador de aire Mca. Tuthill, serie Competidor, Modelo 3003-21L2 para liberar 100 SCFM de aire y operado por un motor de 7.5 H.P.	1	Equipo	<b>\$50,000.00</b>
3	Suministro e instalación de Picadora de martillo para composta Modelo M-13 Marca MAPUSA, con capacidad de triturado de hojas y ramas de hasta 2.5" de diámetro.	1	Equipo	<b>\$16,668.00</b>
4	Báscula digital Mca. Toro Rey, Modelo EQMI-200/400 con rango de pesado de 1 a 200 kg.	1	Equipo	<b>\$15,000.00</b>
5	Medidor de humedad relativa y temperatura Mca. Oakton con membrana de medición	1	Equipo	<b>\$3,600.00</b>
6	Madera triplay para armado y preparación de cajoneras de composteo.	21.6	M <sup>2</sup>	<b>\$2,100.00</b>
7	Herramienta menor como carretilla, pala y machete	1	Lote	<b>\$900.00</b>
8	Equipos de seguridad e higiene para el operador de la planta piloto de composteo.	1	Lote	<b>\$1,250.00</b>
	Importe Total			<b>\$159,518.00</b>



## **CAPITULO 3. Resultados y Discusión**

### **3.1 En el diseño y construcción de la Planta Piloto.**

El diseño de la Planta Piloto se concluyó con la elaboración de los planos correspondientes dibujados en AutoCad y la generación de los volúmenes de obra correspondientes que pueden ser observados en el Anexo N° II del Capítulo N° 6. El proceso de construcción de la obra inició el día 05 de Noviembre de 2007 y concluyó el día 31 de enero de 2008 habiendo transcurrido un total de 87 días (42 días naturales más de lo programado en el contrato correspondiente) debido a que la obra inició con un atraso de más de 60 días por motivo de que el contratista no recibió los anticipos correspondientes en las fechas establecidas por parte de la CAPA. La figura 3.1 permite observar las instalaciones concluidas de la Planta Piloto de Composta, el cual como diseño y construcción final resultó ser un éxito alcanzado, contrario a las acciones de gestión que no beneficiaron al Proyecto por los alargados tiempos de ejecución.



**Figura 3.1** Instalaciones concluidas de la Planta piloto de composta “Primer Centenario”

### **3.2 En la Evaluación de la Planta Piloto**

Los resultados de la evaluación se presentan para las etapas: de composteo, muestreo y análisis de control de calidad de los productos obtenidos (tipos de composta), resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por ECOSUR, el Laboratorio Acreditado y un análisis e interpretación con la NOM-004-SEMARNAT-2002 de los resultados microbiológicos resultantes.

#### **3.2.1 Etapa de Composteo**

Se realizaron 2 etapas de composteo: a nivel experimental y en escala piloto, cada una con 8 diferentes composiciones de mezclas o tipos de composta. Las mezclas experimentales fueron realizados en 8 tinajas de PVC para obtener información preliminar que nos permitió mejorar nuestros criterios de planeación y evaluación del método aplicado, por lo que en este trabajo de tesis no se presentarán los resultados obtenidos de los estudios preliminares y sólo se presentan y discuten los resultados obtenidos de las 8 mezclas en escala piloto.

##### **3.2.1.1 Preparación de mezclas**

Las 8 mezclas obtenidas a escala piloto quedaron como señala la Tabla 3.1. Cabe señalar que el lodo utilizado para la preparación de las mezclas fue lodo fresco de la producción del día con la finalidad de evitar interferencias en los resultados por motivo de los factores ambientales y del mal manejo que actualmente se les da a los mismos.

Las 8 mezclas fueron depositadas en cajoneras de madera (Figuras 3.3 y 3.4) para formar las pilas estáticas aireadas, donde alcanzaron una altura máxima inicial de 90 centímetros. Durante la noche fueron cubiertas con lonas de polietileno para evitar exponerlos a probables lluvias, mientras que durante el día permanecieron descubiertas y bajo observación.

**Tabla 3.1** Preparación de 8 Mezclas

Conceptos	Mezclas de sustratos (tipos de tratamiento)							
	Lodo residual + Poda		Lodo residual + Bagazo		Lodo residual + Aserrín		Lodo residual + Bagazo + Poda	
Nº de identificación	1	4	2	5	3	6	7	8
Fecha de preparación	10-dic-07	28-dic-07	11-dic-07	26-dic-07	28-dic-07	28-dic-07	26-dic-07	26-dic-07
Proporción en volumen de la pila	1:1	2:1	1:1	2:1	1:1	2:1	1:1:1	1:2:1
Volumen final de la pila (m <sup>3</sup> )	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Masa (kg)	248.6 + 55.65 = <b>304.25</b>	329.73 + 36.47 = <b>366.20</b>	248.60 + 62.40 = <b>311</b>	329.73 + 39.13 = <b>368.86</b>	248.6 + 72.60 = <b>321.20</b>	329.73 + 46.50 = <b>376.23</b>	162.26 + 39.13 + 36.47 = <b>237.86</b>	124.3+ 62.4 + 27.825 = <b>214.53</b>
Observaciones:	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día	Con volteo manual cada 5º día

Este proyecto trajo como resultado la generación de un empleo directo ya que fue contratada una persona para la operación de la Planta Piloto de composta. Personal que nos apoyó en las actividades de preparación de las mezclas, vigilancia, monitoreos de temperatura y protección de los mismos cuando se presentaron las lluvias.

### 3.2.1.2 Monitoreo del Proceso de composteo

En esta etapa se hizo un seguimiento de los parámetros de temperatura y humedad en cada una de las pilas preparadas con una frecuencia de 3 lecturas por día. La Tabla 3.2 muestra el promedio diario en las variaciones de temperatura que se dieron a lo largo del proceso, mientras que la Figura 3.2 grafica este comportamiento a lo largo de 28 días de composteo.

**Tabla 3.2** Variaciones en la temperatura promedio diario a lo largo del proceso de composteo

Fecha	N° de día	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	Mezcla 7	Mezcla 8
		T °C							
26/12/2007	1	31.10	40.40	29.80	32.00	29.20	31.90	35.15	39.00
27/12/2007	2	46.00	38.80	45.45	31.50	41.20	31.00	42.45	45.00
28/12/2007	3	45.80	41.80	41.80	31.70	41.80	31.50	49.00	50.90
29/12/2007	4	45.95	44.60	46.50	45.50	49.30	44.40	52.10	56.70
30/12/2007	5	45.20	41.20	46.70	50.10	52.30	48.30	55.60	59.00
31/12/2007	6	45.80	45.00	46.80	51.40	50.00	50.20	56.00	57.60
01/01/2008	7	41.20	43.20	49.70	51.20	49.50	50.10	56.20	58.30
02/01/2008	8	38.95	39.85	43.95	48.05	50.60	51.05	69.80	66.40
03/01/2008	9	37.55	41.50	43.25	44.05	51.50	46.15	63.90	64.25
04/01/2008	10	41.55	46.50	48.60	48.80	55.30	49.10	64.00	66.00
05/01/2008	11	40.00	43.80	51.00	54.00	54.90	51.50	66.00	67.90
06/01/2008	12	42.90	44.30	53.00	56.80	57.00	55.00	67.10	68.00
07/01/2008	13	42.70	43.50	55.00	60.00	62.60	54.30	65.00	65.40
08/01/2008	14	40.50	43.70	52.00	58.00	64.00	52.50	62.00	63.00
09/01/2008	15	36.80	38.80	51.00	55.00	61.00	53.00	59.00	61.00
10/01/2008	16	37.00	39.00	51.60	47.70	52.00	53.00	53.00	55.70
11/01/2008	17	36.95	40.40	49.00	45.00	48.00	52.00	48.00	55.00
12/01/2008	18	36.15	38.80	50.00	48.00	49.00	51.00	49.00	53.00
13/01/2008	19	39.25	43.10	54.00	50.00	51.00	52.00	53.00	54.00
14/01/2008	20	33.50	40.80	52.00	45.00	47.00	50.00	53.00	55.00
15/01/2008	21	41.20	43.60	44.50	44.50	41.50	43.50	47.50	47.50
16/01/2008	22	34.40	44.30	44.00	41.00	40.00	42.00	45.00	46.00
17/01/2008	23	40.50	47.10	44.00	45.00	35.00	40.00	43.00	41.00
18/01/2008	24	44.95	44.05	39.00	40.00	37.00	38.00	41.00	45.00
19/01/2008	25	42.90	35.10	39.00	41.00	39.00	40.00	39.00	45.00
20/01/2008	26	47.00	45.10	38.00	40.00	38.00	39.00	40.00	42.00
21/01/2008	27	46.50	45.00	38.20	40.50	38.20	38.90	40.10	41.50
22/01/2008	8	46.00	44.90	38.00	40.10	38.30	38.80	39.30	41.00

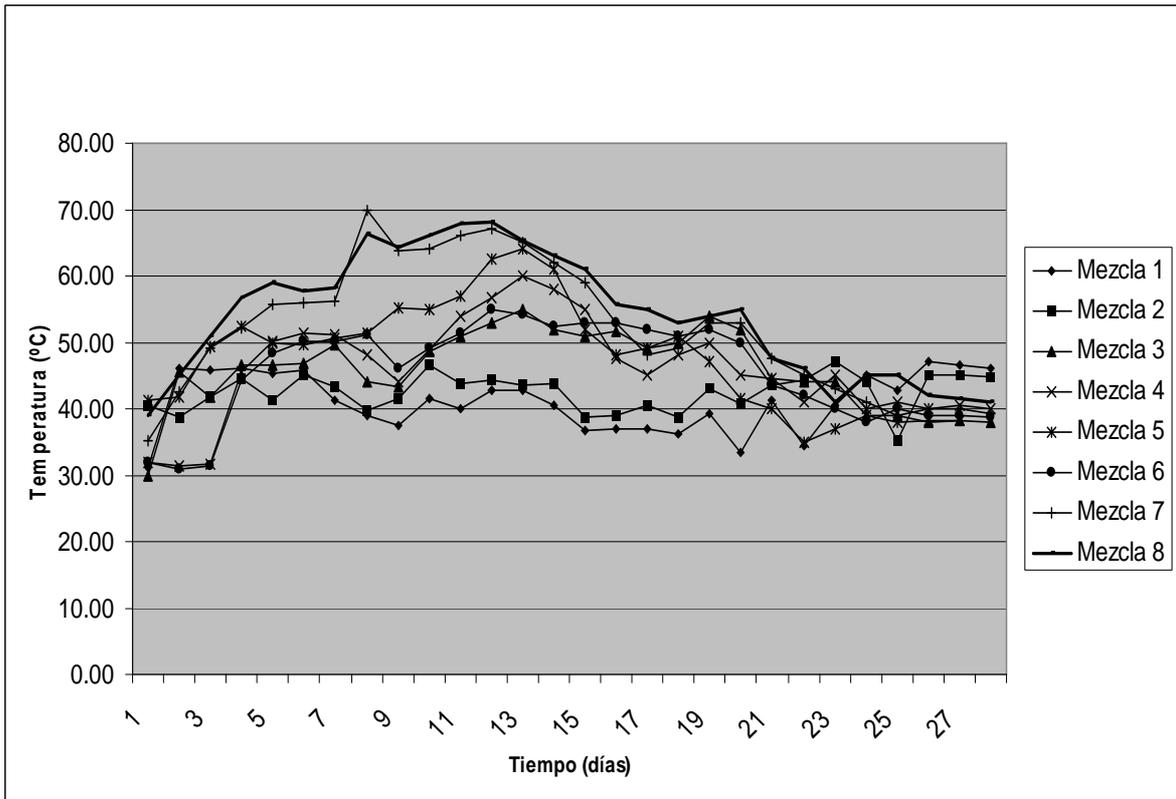
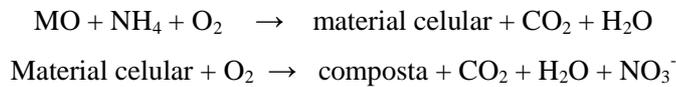


Figura 3.2 Variaciones en la temperatura a lo largo del proceso de composteo en las pilas estáticas

Las mediciones fueron realizadas con un medidor de humedad relativa y temperatura marca Oakton con membrana de medición.

Las reacciones químicas que se llevaron a cabo durante el proceso de composteo se presentan a continuación.



Donde:

- MO = Materia Orgánica
- NH<sub>4</sub> = Nitrógeno disponible en forma de amoníaco
- O<sub>2</sub> = Oxígeno libre
- Material celular = son los microorganismos presentes
- CO<sub>2</sub> = Dióxido de Carbono
- H<sub>2</sub>O = Agua
- NO<sub>3</sub> = Nitrógeno disponible en forma de nitritos

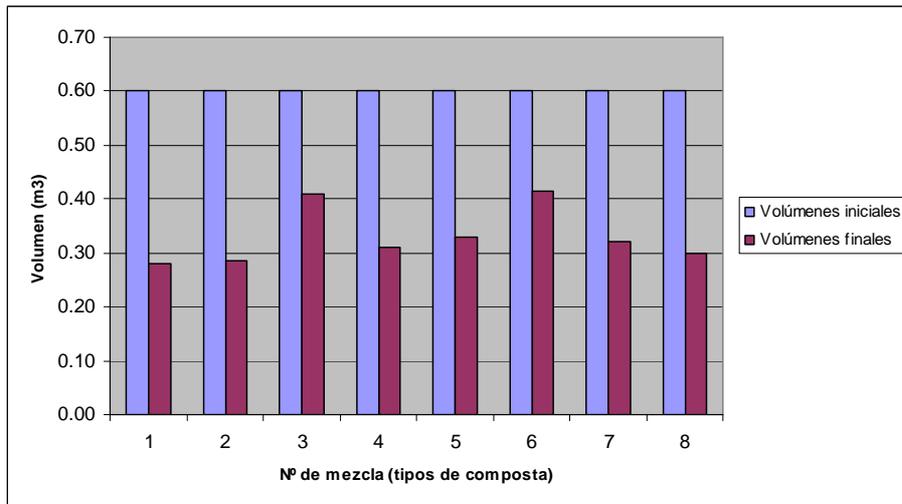
El proceso de estabilización termofílica inició el día 26 de diciembre de 2007 y concluyó el 26 de enero de 2008 conforme a lo programado (30 días). Durante este período de tiempo se tuvo una precipitación pluvial total de 52.4 mm (lluvias moderadas) y una temperatura ambiente de 25.1°C en la zona de estudio (de acuerdo a los registros de la Estación Meteorológica de la Comisión Nacional del Agua).

Como consecuencia de los atrasos que se tuvieron en la construcción de la Planta Piloto, todo el proceso de composteo se realizó con ventilación natural mediante volteo manual de las pilas estáticas que en un principio se realizaba cada 2 días, pero conforme se observaba que los registros de temperatura no rebasaban los 60 °C, se optó por realizar el volteo en periodos de 5 días. Esta decisión trajo beneficios al proceso debido a que con ello algunas pilas llegaron a alcanzar cerca de 70 °C como en el caso de las mezclas N° 7 y N° 8 que presentaron temperaturas máximas de 69.8 y 68°C respectivamente.

Cumplidos ya 4 semanas de composteo, la temperatura de las mezclas se mantuvieron estables, por lo que se dio por concluido esta etapa, fueron suspendidos los registros de temperatura en las mezclas y se procedió a calcular los porcentajes de reducción en volumen en cada una; se observó que la mayoría redujeron su volumen en un 50% en promedio, a excepción de las mezclas 3 y 6 preparadas con el aserrín las cuales redujeron su volumen en un 30% solamente, posiblemente debido a que los residuos de madera son muy duros y lentos para degradar por los microorganismos. Los porcentajes de reducción de volumen pueden observarse en las Figuras 3.3 y 3.4, mientras que la Figura 3.5 compara los porcentajes de reducción de volumen en las 8 mezclas (tipos de composta)

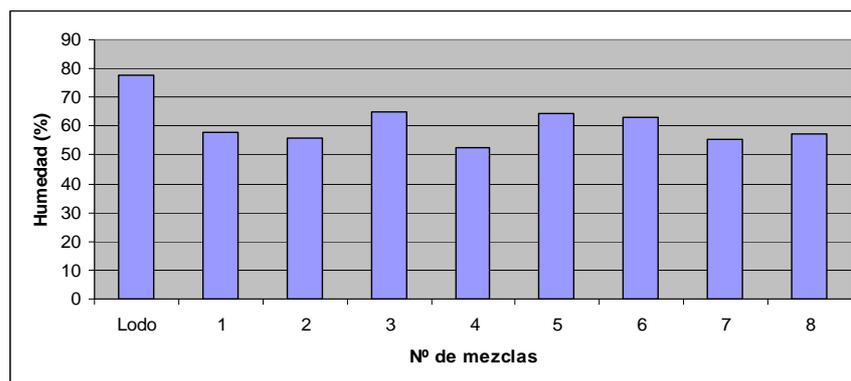


**Figura 3.3 y 3.4** Volumen de las mezclas antes y después del proceso de composteo



**Figura 3.5** Porcentajes de reducción de volumen en las 8 mezclas (tipos de composta)

Al final del proceso de composteo, se realizó la determinación de los porcentajes de humedad alcanzados en cada una de las mezclas para compararlos con el % inicial de humedad de los lodos frescos recién deshidratados, los cuales se muestran en la Figura 3.6 donde se observa que la mezcla N° 4 es la que menor porcentaje de humedad presentó. El método aplicado para la determinación del contenido de humedad es el gravimétrico ya que tiene la ventaja de ser simple y no utiliza equipo sofisticado.



**Figura 3.6** Porcentaje de humedad encontrado al final del proceso de composteo en las diferentes mezclas.

### **3.2.1.3 Generación de olores y atracción de vectores**

En los primeros días del proceso de composteo se generaron olores característicos que se percibían al momento de preparar las mezclas y luego a pocos metros de las pilas estáticas, sin embargo, a los pocos días (3-5 para ser exactos) se fueron disipando hasta volverse nulos como consecuencia de la aireación de las pilas y el volteo periódico a que se sometían. Esto nos permitió desechar la idea de implementar algún sistema de control de olores. Tampoco fue necesaria la implementación de métodos de eliminación de vectores por razones de que no se presentaron. Esto nos permite observar algunas ventajas de los procesos de composteo aerobios Vs los anaerobios puesto que son más aceptados por el personal a cargo de la operación y la sociedad que habita en la cercanía de este tipo de instalaciones.

### **3.2.2 Muestreo y análisis de control de calidad de los productos obtenidos (tipos de composta)**

Aplicando el procedimiento de muestreo de lodos y biosólidos que solicita y describe la NOM-004-SEMARNAT-2002 en su ANEXO II, se hicieron muestreos y análisis de los productos obtenidos para determinar la calidad de la composta. Todas las pruebas fisicoquímicas y de carga microbiológica se realizaron en los laboratorios de Microbiología Ambiental y de Análisis de Suelos de ECOSUR, unidades Chetumal y San Cristóbal de las Casas respectivamente. Estos muestreos y análisis fueron realizados el día 14 de febrero de 2008 (cuando las mezclas cumplieron 7 semanas de proceso de composteo) y estuvo a cargo del personal calificado que participa en el Proyecto autorizado dentro de los Fondos Mixtos del CONACYT-Gobierno del Estado.

Las técnicas analíticas aplicadas se describen en la NOM-021-RECNAT-2000 (pruebas fisicoquímicas) y en los Anexos II, III, IV y V de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (muestreo y determinación de Coliformes Fecales, *Salmonella spp* y Huevos de Helminto respectivamente). Los resultados obtenidos se presentan de manera concentrada en la Tabla 3.3.



**Figura 3.7 y 3.8** Personal del laboratorio acreditado y equipo de muestreo para el estudio fisicoquímico y microbiológico de las 8 mezclas

Como complemento de los resultados obtenidos por el ECOSUR y con la finalidad de observar el comportamiento de las mezclas cuando son sometidas a mayores periodos de composteo, se procedió a realizar un nuevo muestreo y análisis de las 8 mezclas de composta solicitando los servicios de un laboratorio acreditado; actividad que se llevó a cabo el día 28 de marzo de 2008 cuando las mezclas ya cumplían 93 días naturales de proceso de composteo y curado (13 semanas). Las Figuras 3.7 y 3.8 atestiguan los procedimientos mencionados, mientras que la Tabla 3.5 concentra los resultados obtenidos por el Laboratorio Acreditado.

### **3.2.3 Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por ECOSUR**

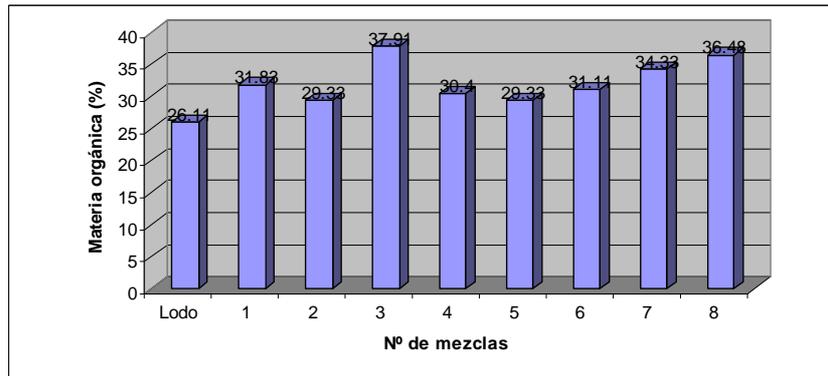
Estos resultados demuestran que después de 7 semanas, las mezclas ya presentaban buenas características agronómicas debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes, sin embargo estas mezclas presentaban poca estabilidad del componente orgánico por la alta concentración de patógenos que todavía presentaban.

Todas las mezclas presentaron buena relación de C:N, los cuales estuvieron dentro del rango de 20:1 hasta 30:1, siendo más notorio en la mezcla N° 8 que presentó una relación de 30:1, lo cual fue congruente con las propiedades mejor balanceadas de nutrientes fisicoquímicos que presentó esta mezcla.

**Tabla 3.3** Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por ECOSUR.

PARÁMETROS	UNIDAD	A (fresco 100%)	RESULTADOS ALCANZADOS EN 8 MEZCLAS EXPERIMENTALES (TIPOS DE COMPOSTA)							
			Nº 1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8
			A+C (1:1)	A+B (1:1)	A+D (1:1)	A+C (2:1)	A+B (2:1)	A+D (2:1)	A+B+C (1:1:1)	A+B+C (1:2:1)
Potasio	Cmol/kg	3.2855	17.1611	6.8389	4.3913	11.4175	6.1675	4.8836	12.2193	14.1975
Magnesio	Cmol/kg	13.6831	12.1605	10.2469	10.7819	13.7037	14.6091	12.0165	10.6379	10.0617
Calcio	Cmol/kg	36.7078	31.8675	34.3438	35.2919	25.3119	43.0888	32.6347	28.7788	26.2101
Sodio	Cmol/kg	2.9913	5.8326	4.6217	3.8011	5.4348	4.6185	4.3587	5.5283	5.3081
Hierro	Mg/kg	163.7875	172.6375	126.225	122.525	167.175	271.575	165.825	325.95	192.85
Cobre	Mg/kg	87.575	61.9375	77.375	59.25	73.525	91.475	80.725	43.475	44.0625
Manganeso	Mg/kg	15.075	17.4625	17.625	14.1	15.1	21.4	18.3	24.925	37.3125
Zinc	Mg/kg	191.1625	152.4625	139.05	118	183.225	204.6	174.15	120.075	112.0125
D.A.	Gr/ml	0.77	0.6	0.57	0.45	0.72	0.67	0.47	0.51	0.55
pH	H2O	6.33	6.48	5.93	5.82	6.29	6.03	5.78	6.64	6.99
C.E.	dS/m	6.1	7.3	7.3	6.5	4.8	7.5	6.9	4.7	3.8
N total	%	2.89	2.54	2.66	2.66	2.85	2.81	3.12	2.35	2.16
M.O.	%	26.11	31.83	29.33	37.91	30.4	29.33	31.11	34.33	36.48
CIC	Cmol/kg	171.4	281.4	177.8	165.9	152.1	165.9	152.1	173.2	162.2
CaCO3	%	15.95	16.9	16.6	13.4	16.45	16.4	15.65	17.25	17.4
NO3	Mg/kg	4277.8	3831.2	5710.2	7347.1	1697.7	6243.4	7308.6	2094.5	1265.2
NH4	Mg/kg	871.1	130.9	320.1	415.4	299.9	297.1	1751.4	110.2	55.1
P(Olsen)	Mg/kg	872.1	907	943.4	810.9	853.1	678.5	991.4	642.1	661
P(vegetal)	%	2.367	1.645	1.905	2.078	2.15	2.15	2.41	1.327	1.24
P(vegetal)	Cmol/kg	76.4	53.1	61.5	67.1	69.4	69.4	77.8	42.8	40
Coliformes fecales	NMP/gr ST	4.2x10 <sup>5</sup>	6.43x10 <sup>5</sup>	1.63x10 <sup>5</sup>	4.2x10 <sup>5</sup>	4.2x10 <sup>5</sup>	4.2x10 <sup>5</sup>	7.68x10 <sup>4</sup>	1.02x10 <sup>5</sup>	7.68x10 <sup>4</sup>
Salmonella spp	NMP/gr ST	4.52x10 <sup>8</sup>	4.86x10 <sup>6</sup>	1.79x10 <sup>7</sup>	1.62x10 <sup>4</sup>	7.86x10 <sup>4</sup>	0	0	3.24x10 <sup>5</sup>	7.68x10 <sup>4</sup>
Huevos de Helminto	Huevos/gr ST	0	0	0	0	0	0	0	0	0

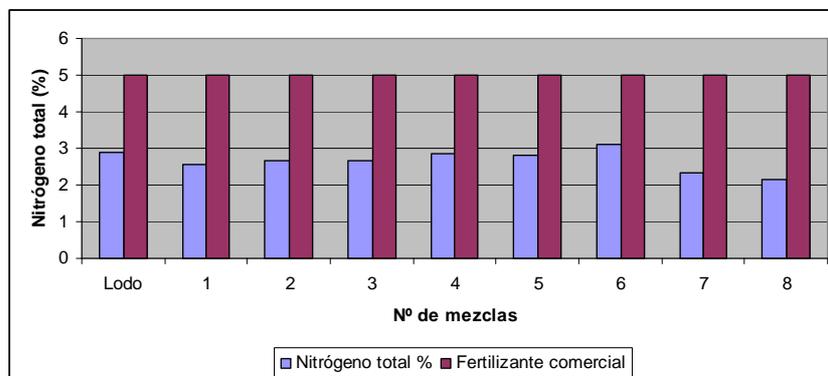
**A** = lodo      **B** = bagazo      **C** = poda      **D** = aserrín



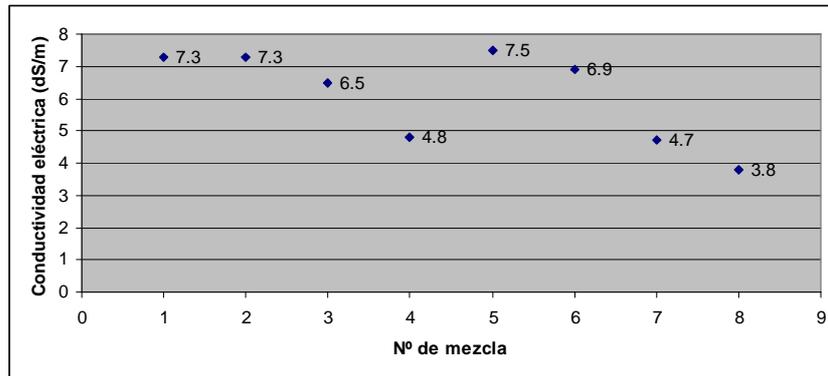
**Figura 3.9** Porcentajes alcanzados de Materia Orgánica

La Figura 3.9 muestra los porcentajes alcanzados de materia orgánica y permite considerarlos dentro de la categoría de suelos orgánicos que reconoce la NOM-021-RECNAT-2000 por contener más de 16% de materia orgánica.

La Figura 3.10 reporta los valores encontrados de Nitrógeno Total en los biosólidos estabilizados y los compara con el porcentaje encontrado en los fertilizantes comerciales, como se puede observar son menores en las 8 mezclas (biosólidos) tal como se señaló en la Tabla 1.3. Situación que les da la razón a algunos autores que afirman que los abonos orgánicos no pueden competir con los fertilizantes químicos, aunque ellos le restan importancia al hecho de que los segundos causan mayores problemas ambientales y la ventaja de los abonos orgánicos está en que el nitrógeno se encuentra en formas orgánicas que sólo quedan disponibles a las plantas en pequeñas concentraciones, pero que estarán disponibles en varios ciclos agrícolas después de la aplicación.



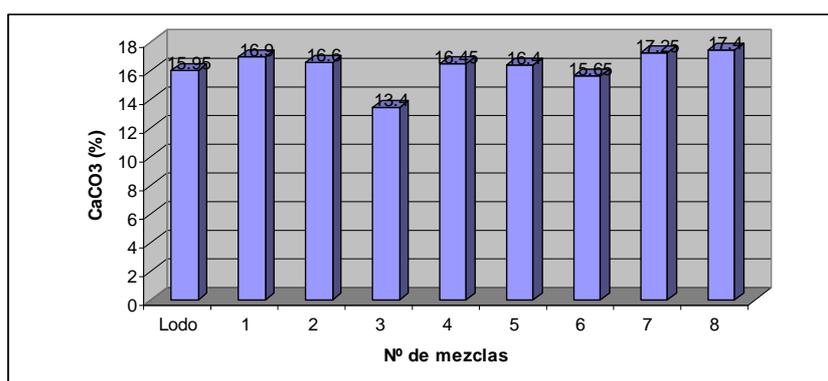
**Figura 3.10** Nitrógeno total comparado con fertilizantes comerciales



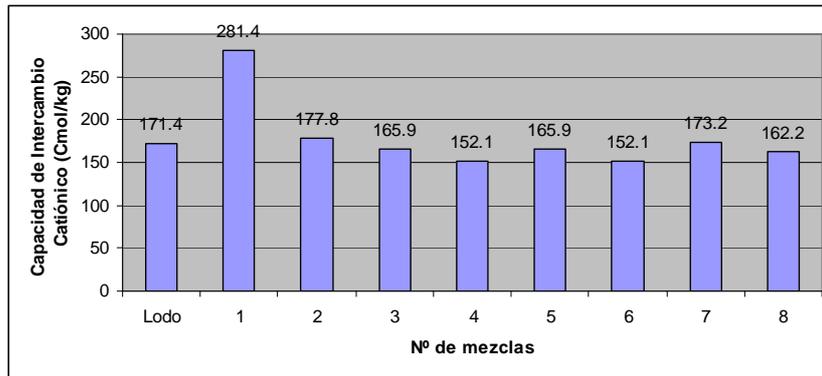
**Figura 3.11** Conductividad eléctrica de las 8 mezclas

La Figura 3.11 muestra que 7 mezclas se encuentran en un rango de 4.1 – 8.0 dS/m de conductividad eléctrica que los ubica en la categoría de suelos salinos de la NOM-021-RECNAT-2000 y sólo la mezcla N° 8 recae en la clasificación de moderadamente salino. Esto afectaría al rendimiento de los cultivos muy sensibles como es el caso de algunos vegetales.

Los carbonatos representados en la Figura 3.12 se encuentran en cantidades altas debido a que provienen de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y la dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) que es muy común encontrar en la Península de Yucatán. Estas altas concentraciones hacen suponer que pueden presentar un problema de desbalance con otros elementos que se encuentran en el complejo de intercambio, como el fósforo y algunos microelementos.



**Figura 3.12** Carbonatos de calcio encontrados



**Figura 3.13** Capacidad de intercambio catiónico de las 8 mezclas de composta

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) aumentó un 64% en la mezcla N° 1 con respecto a su concentración en el lodo residual fresco (Lodo) tal como se muestra en la Figura 3.13. Esta capacidad es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca de la arcilla presente, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo de los suelos.

### **3.2.4 Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por Laboratorio Acreditado**

En la Tabla 3.4 se presenta un resumen del contenido de metales pesados que contenían los lodos producidos en la Planta Primer Centenario en el año 2005, comparado con los encontrados en el presente año. En ambos casos se demuestra que los lodos producidos son de tipo excelente en cuanto a su contenido de metales pesados por estar dentro de los Límites Máximos Permitidos solicitados por la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que pueden ser considerados susceptibles de aprovechamiento. Es necesario aclarar que en el año 2005, esta planta de tratamiento recibía sólo el 50% del total de agua que recibe actualmente por motivo de que nuevas zonas de la ciudad con servicio de alcantarillado sanitario se incorporaron recientemente a las zonas de aportación de esta planta de tratamiento; por tal motivo es normal que se presenten algunas variaciones sustanciales en algunos parámetros.

**Tabla 3.4** Concentración de metales pesados en el lodo residual producido en la Planta “Primer Centenario” (CAPA).

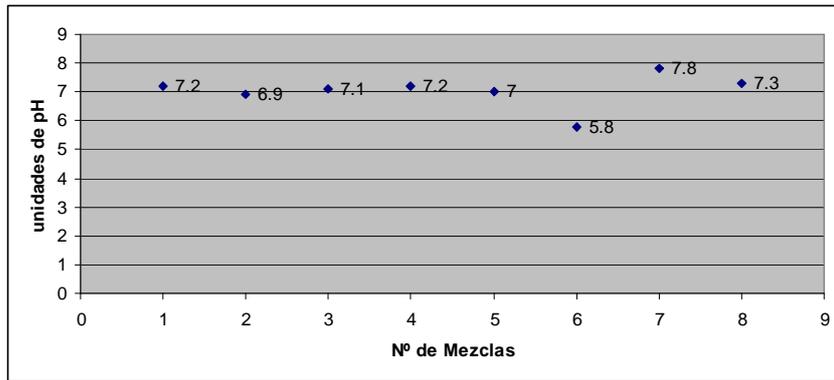
Metal pesado	Concentración 2005 (mg/kg)	Concentración 2008 (mg/kg)	LMP para biosólidos excelentes de acuerdo a la NOM-004- SEMARNAT-2002
Arsénico	0.0163	1.0463	41
Cadmio	0.4945	0.0379	39
Cromo Total	5.6356	0.0076	1200
Cobre	86.4301	231.0599	1500
Plomo	29.0582	54.2724	300
Mercurio	0.5326	1.2401	17
Níquel	8.5702	10.6956	420
Zinc	207.9017	817.6709	2800

La NOM-021-RECNAT-2000 señala que los cultivos pueden tolerar bajo condiciones normales hasta concentraciones de Cd [0.35 mg/kg], Pb [35 mg/kg] y Ni [50 mg/kg] sin causar daño a los cultivos, pero en concentraciones de 3 a 5 (de Cd) y concentraciones mayores de 100 para el Pb y Ni, pueden ser peligrosos para los cultivos. Por lo anterior y debido a que los resultados obtenidos en los años 2005 y 2008 están por debajo de los valores recomendados, puede concluirse nuevamente que los lodos producidos en la Planta Centenario son libres de contener elementos tóxicos en cantidades perjudiciales a los cultivos agrícolas, lo cual posibilita su aprovechamiento como mejoradores de suelo o abonos orgánicos, sin riesgo para el medio ambiente ya que al entrar al suelo los metales quedarían en la fracción inmóvil, por lo que no podrían ser biodisponibles.

**Tabla 3.5** Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica obtenidos por Laboratorio Acreditado

PARÁMETROS	UNIDAD	A (fresco 100%)	RESULTADOS ALCANZADOS EN 8 MEZCLAS EXPERIMENTALES (TIPOS DE COMPOSTA)							
			Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	Nº 6	Nº 7	Nº 8
			A+C (1:1)	A+B (1:1)	A+D (1:1)	A+C (2:1)	A+B (2:1)	A+D (2:1)	A+B+C (1:1:1)	A+B+C (1:2:1)
pH	unidades de pH		7.2	6.9	7.1	7.2	7	5.8	7.8	7.3
Humedad	%	77.5	57.7	56	64.8	52.7	64.5	62.8	55.5	57.4
Conductividad eléctrica	µS/cm		10000	10000	10000	10000	10000	10000	6200	7000
Salinidad efectiva	meq/L	19.52	66.99	140.63	47.46	119.45	49.63	58.65	114.35	111.91
Carbono Orgánico Total	%	2.98	3.71	3.65	3.45	3.45	3.62	3.65	3.42	3.63
Sólidos Totales	%	23	41.3	43.1	35.3	45.3	36.4	37.5	42	41
Sólidos Volátiles	%	13.9	19.7	21.3	20.8	20.5	17.2	20.3	20.4	20.3
Nitratos (como N-Inorg)	mg/Kg		300	210	300	230	168.5	282.5	50	84.5
Nitrógeno Total	mg/Kg	12.1	11.2	11.9	7.8	12.9	10.9	8.8	10.1	11.4
Fósforo total	mg/Kg	7.1	7.4	6.6	4.3	8	7.7	5	6.1	6.4
Fierro	mg/Kg		4838.9	4308.7	3360.5	4855.6	5259.3	3723.3	3801	3961
Manganeso	mg/Kg		122.5	99.3	9690.7	10990.6	121.9	93.4	100.4	134.4
Zinc	mg/Kg	817.670 9	952.5	745.2	709.6	947.6	1033.8	745.1	686.7	700.7
Cobre	mg/Kg	231.059 9	252.4	217	204.2	300.9	277.6	216.9	153.4	138.5
Calcio	meq/100g	364	463.75	444.95	352.96	517.1	506.49	382.96	424.22	359.59
Magnesio	meq/100g		101.39	107.72	80.75	91.59	90.94	68.56	172.3	77.89
Sodio	meq/100g		3.5	5.9	2.6	2.8	2.5	2.9	5.2	4.7
Potasio	meq/100g	0.9	3.5	8.1	2.2	3.2	2.4	3	6.2	6.5
Cloruros	meq/L		6.9	19	6.2	17.9	6.9	16.6	15.9	15.2
Carbonatos	meq/L		0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfatos (Como SO4=)	meq/L		43.3	39.6	42.6	44.5	32.8	35.3	26.9	2
Coliformes Fecales	NMP/g de solidos totales	1100	< 3	240	< 3	24000	23	4	9	9
Salmonella	NMP/g de solidos totales	9	< 3	9	< 3	9	23	4	< 3	9
Huevos de Helminto	NHH / g de solidos totales	0	.5	1.5	1	1	0	1.5	1	1.5

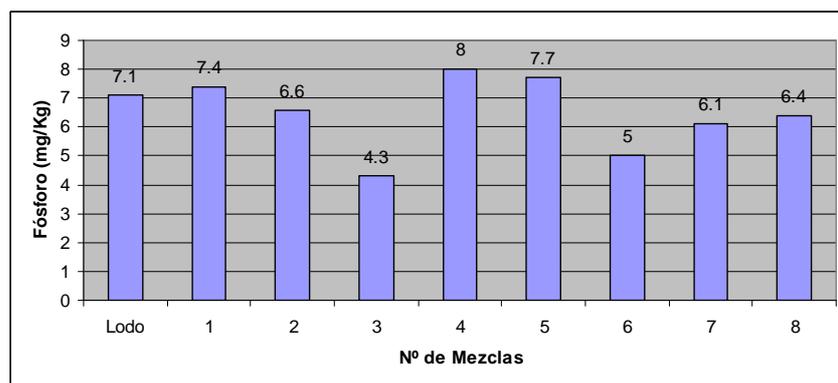
A = lodo      B = bagazo      C = poda      D = aserrín



**Figura 3.14** Unidades de pH

La Figura 3.14 de pH demuestra que a excepción de las mezclas 6 y 7, todas mantuvieron el pH neutro, mientras que la mezcla 6 resultó ser moderadamente ácido y la mezcla 7 medianamente alcalino de acuerdo a la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000.

La Figura 3.15 nos enseña que los niveles de fósforo aprovechable están para las mezclas N° 1, 2, 4, 5, 7 y 8 dentro de las clases medio que clasifica la NOM-021-RECNAT-2000, mientras que las mezclas 3 y 6 presentan niveles bajos de presencia de fósforo aprovechable. Esto podría estar relacionado con el tipo de sustrato utilizado en estas 2 mezclas debido a que en ambos casos fueron utilizados residuos de madera (aserrín).



**Figura 3.15** Fósforo aprovechable (mg/Kg)

### 3.2.5 Análisis de los resultados microbiológicos obtenidos por ECOSUR y el Laboratorio Acreditado.

Los resultados obtenidos por el Laboratorio Acreditado registran mejores niveles de estabilización en cuanto a su contenido de microorganismos indicadores, patógenos y parásitos, que los determinados por el ECOSUR, lo cual se justifica por los mayores periodos de compostaje y curado a que se habían sometido las 8 mezclas cuando se procedió a la toma de muestra y análisis por parte del Laboratorio Acreditado (13 contra 7 semanas para ser exactos).

La Figura 3.16 muestra el comportamiento de Coliformes fecales en las 8 mezclas cuando ya habían cumplido 7 y 13 semanas. Después de 7 semanas se puede observar todavía una gran densidad de organismos coliformes en las 8 mezclas; atribuyo este incremento para todos los casos a la naturaleza del lodo residual, que al no estar bien digerido desde el digestor aerobio (descontrol en la operación del tanque digestor), los lodos producidos presentan una gran densidad y diversidad de microorganismos que encuentran en las mezclas (tipos de composta) y sustratos (bagazo, poda y aserrín) un medio propicio para desarrollarse. También puede deberse a la falta de oxígeno en las mezclas (ya que no se opero el soplador) y al exceso de humedad presente en las mezclas como producto de las lluvias. Sin los microorganismos redujeron rápidamente su población a mayores tiempos de composteo e intemperización.

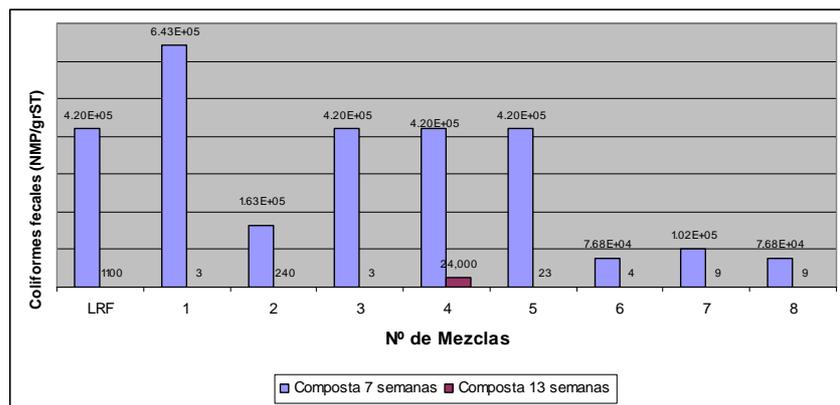
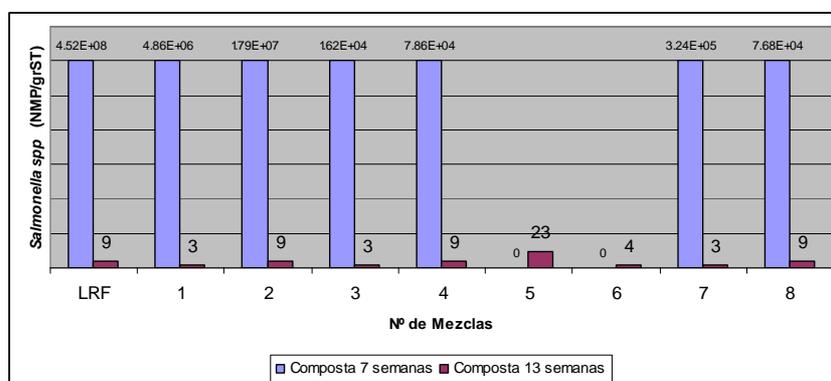


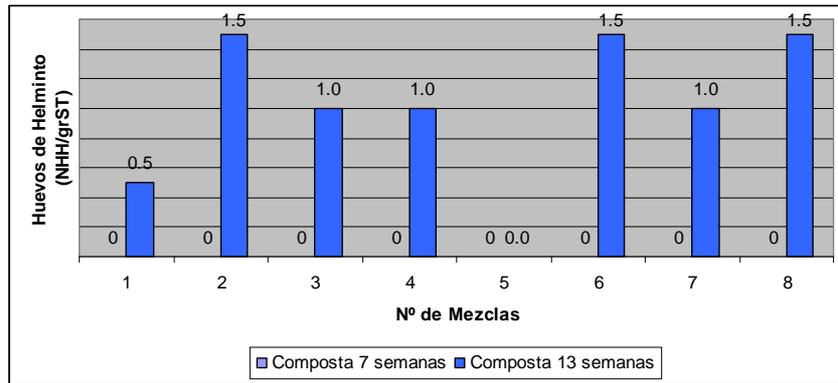
Figura 3.16 Comportamiento de Coliformes Fecales en 8 mezclas después de 7 y 13 semanas

La mezcla N° 4 (lodo + poda en proporción 2:1) presentó a las 7 semanas un crecimiento de coliformes fecales de  $4.2 \times 10^5$  y a las 13 semanas sólo redujo su densidad a 24,000 microorganismos resultando contraproducente para la misma mezcla ya que con esa cantidad ( $>1,000$ ) inmediatamente se clasifica como de Clase C de conformidad con la NOM-004-SEMARNAT- 2002.

La Figura 3.17 muestra el comportamiento de *Salmonella spp* en las 8 mezclas cuando ya habían cumplido 7 y 13 semanas. Después de 7 semanas se puede observar todavía una gran densidad de bacterias *Salmonella spp*. Atribuyo estos incrementos a la misma razón señalada anteriormente con respecto a la mala operación del digestor aerobio. Se puede observar que las mezclas 5 y 6 (Lodo-Bagazo y Lodo Aserrín) resultaron en todo tiempo no muy propicios para el desarrollo de la especie *Salmonella*, siendo aún mejor la mezcla N° 6 (lodo + aserrín en proporción 2:1), posiblemente causado por lo inerte y mayor dureza ( $< \% BD$ ) de este material acondicionador. Al someter las mezclas a mayores tiempos de intemperismo (13 semanas), el número de patógenos disminuye a valores que permiten interpretarlo dentro de la clasificación de la NOM-004-SEMARNAT-2002.



**Figura 3.17** Comportamiento de *Salmonella spp* en 8 mezclas después de 7 y 13 semanas



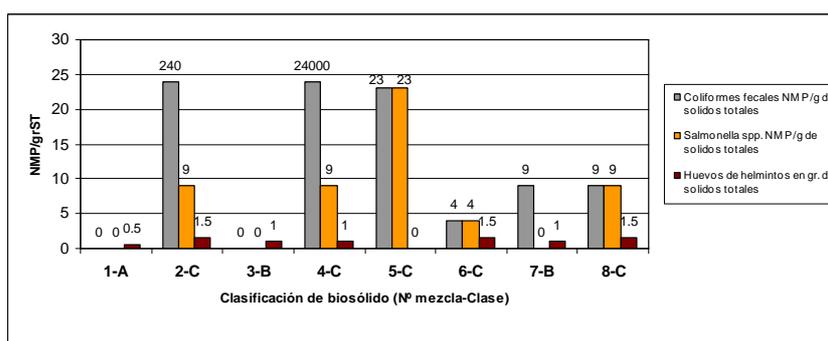
**Figura 3.18** Comportamiento de Huevos de Helminto en 8 mezclas

La Figura 3.18 nos muestra el comportamiento del N° de Huevos de helminto encontrados a las 7 y 13 semanas. ECOSUR obtuvo que a las 7 semanas no existían Huevos de helminto, mientras que el Laboratorio Acreditado encontró mínimos valores a las 13 semanas. La discrepancia entre los resultados se debe posiblemente a que con el paso del tiempo los Huevos de helminto eclosionan y presentan una mínima reproducción en la fase de composteo y curado. El laboratorio acreditado informó que ninguno de los Huevos de Helminto encontrado en las 8 mezclas demostró ser viable por lo que no tienen facilidad de reproducción o transmisión de enfermedades. Esto nos mantiene la posibilidad de aplicarlo para fines agrícolas y forestales o su uso en áreas urbanas con restricciones y manejo especial.

La Tabla 3.6 presenta a manera de resumen la clasificación de resultados obtenidos en el Proyecto Piloto interpretados de acuerdo con lo señalados en las Tablas 1, 2 y 3 de la NOM-004-SEMARNAT-2002, mientras que la Figura N° 3.19 grafica estos resultados.

**Tabla 3.6** Clasificación de 8 mezclas de acuerdo a los resultados comparados con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Nº de mezcla	CRETIB NOM-052-SEMARNAT-2005 (año 2005)	Tipo de acuerdo al contenido de metales pesados (años 2005 y 2008)	Clasificación en función de patógenos y parásitos (año 2008)	Destino final recomendado
				De acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002
1	Si acredita	Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación
2	Si acredita	Excelente	C	<input type="checkbox"/> Usos forestales <input type="checkbox"/> Mejoramiento de suelos <input type="checkbox"/> Usos agrícolas
3	Si acredita	Excelente	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación
4	Si acredita	Excelente	C	<input type="checkbox"/> Usos forestales <input type="checkbox"/> Mejoramiento de suelos <input type="checkbox"/> Usos agrícolas
5	Si acredita	Excelente	C	<input type="checkbox"/> Usos forestales <input type="checkbox"/> Mejoramiento de suelos <input type="checkbox"/> Usos agrícolas
6	Si acredita	Excelente	C	<input type="checkbox"/> Usos forestales <input type="checkbox"/> Mejoramiento de suelos <input type="checkbox"/> usos agrícolas
7	Si acredita	Excelente	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación
8	Si acredita	Excelente	C	<input type="checkbox"/> Usos forestales <input type="checkbox"/> Mejoramiento de suelos <input type="checkbox"/> Usos agrícolas



**Figura 3.19** Clasificación de 8 mezclas interpretados de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002

## CAPITULO 4. Conclusiones y Recomendaciones

De acuerdo con los resultados fisicoquímicos obtenidos por el Laboratorio de Suelos y Plantas de ECOSUR, todos los tratamientos analizados resultaron ricos en micronutrientes, nitrógeno total y fósforo disponible, sin embargo, la mezcla N° 8 fue la que mejor calidad presentó, debido a los altos contenidos de éstos, bases intercambiables (potasio, magnesio, calcio y sodio), su menor valor de conductividad eléctrica (moderadamente salino) y por la cantidad presente de elementos de interés agronómico mejor proporcionados como el caso de la Materia Orgánica, Nitrógeno total, Fósforo aprovechable y disponible, pH, Carbonatos y Capacidad de Intercambio Catiónico, además de los buenos porcentajes de reducción en volumen y humedad que alcanzó al final del proceso de composteo. Las demás mezclas presentaron variaciones en sus propiedades por lo que se consideran de menor calidad.

Los resultados microbiológicos obtenidos por el laboratorio de Microbiología Ambiental de ECOSUR, demostraron que luego del proceso de compostaje e intemperización de las muestras (por 7 semanas), las mezclas N° 5 y 6 ya cumplían con los Límites Máximos Permisibles (LMP) que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 para los biosólidos de Clase C. Desde el punto de vista parasitológico, ECOSUR no encontró huevos de helminto viables en ninguna de las mezclas (tipos de composta), aunque la concentración de Coliformes fecales se hallaron del orden de  $7 \times 10^4$  a  $6 \times 10^5$  y de *Salmonella spp* del orden de  $1 \times 10^4$  a  $4 \times 10^8$ , hacen suponer una falta de control en los procesos aplicados de tratamiento de lodos en la Planta “Primer Centenario” que pueden ser originados por factores de diseño o de operación. Por lo anterior, es recomendable considerar un proceso complementario de higienización de los biosólidos producidos.

Los resultados fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos por el Laboratorio Acreditado son considerados complementarios a los obtenidos por ECOSUR, debido a que estos fueron muestreados y analizados después de 13 semanas de estabilización (composteo y curado). En cuanto a su contenido de metales pesados, las 8 mezclas (tipos de composta) pueden ser considerados del tipo excelente según la NOM-004-SEMARNAT-2002. La Figura 3.18 permite distinguir la cantidad de microorganismos indicadores de contaminación (Coliformes

fecales), patógenos (*Salmonella spp*) y parásitos (Huevos de helminto) que finalmente alcanzaron las 8 mezclas (tipos de composta), interpretadas de acuerdo a lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002. La mezcla N° 1 según los resultados del laboratorio acreditado alcanzó mayor estabilidad microbiológica clasificándose de Clase A de acuerdo a la Norma, situación que le permite mayores oportunidades de uso. Las mezclas N° 3 y 7 se clasifican de Clase C, lo que les permite utilizarlos para usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. Las demás mezclas (2,4,5,6 y 8) presentaron menor grado de estabilización microbiológica por lo que su uso quedaría restringido y su disposición se llevaría a cabo siguiendo un procedimiento autorizado dentro de un Programa de Manejo Especial e Integral. En base a estos resultados, se recomienda replicar las Mezclas N° 1, 3 y 7 bajo las mismas fórmulas (proporción) y analizarlas de manera continua durante varios ciclos de composteo con la finalidad de encontrar las variables científicas del método aplicado y al mismo tiempo implementar un Sistema de Control de Calidad que garantice la protección del medio ambiente y la salud de la población expuesta a estos productos.

Por otro lado, si los intereses de reuso se enfocan exclusivamente al mejoramiento de suelos para usos agrícolas y forestales, entonces se recomienda aplicar la mezcla N° 8 debido a los microelementos mejor balanceados que presenta y demás propiedades fisicoquímicas que pueden mejorar la calidad de los suelos como son la Materia Orgánica, Nitrógeno Total, Fósforo Aprovechable, Capacidad de Intercambio Catiónico, pH y Conductividad eléctrica que presenta. Aunque esto deberá venir acompañado con una reducción significativa de microorganismos y un Programa de aplicación regulado también por las autoridades ambientales en la materia.

La Planta piloto de composta resultante fue diseñada para producir 8 ton/mes de composta utilizando 4 de un total de 20 m<sup>3</sup> de producción mensual de lodos que actualmente tiene la Planta de tratamiento “Primer Centenario” y demostró ser de fácil operación y mantenimiento con un solo operador. Si se operara al 100% la planta piloto, tendría la capacidad de procesar un 20% de los lodos producidos, por lo que se recomienda ampliarla conforme a la demanda que exista en el mercado de los productos obtenidos (biosólidos).

México requiere de tecnologías para la disposición y aprovechamiento de los lodos, en cuyo desarrollo y adaptación estén considerados los siguientes aspectos: bajo costo de inversión y operación, reducción del impacto al ambiente, el aprovechamiento de la materia orgánica y de los nutrientes que contienen estos desechos; razón por el cual hemos comprobado que el proceso de composteo ofrece ser una tecnología que satisface los aspectos señalados ya que presenta las siguientes ventajas:

- Permitiría a los agricultores contar con un producto de alto contenido de materia orgánica que ayuda al mejoramiento de las características físicas y químicas del suelo.
- Evitaría la explotación del suelo natural. En México son extraídos cientos de toneladas diariamente de bancos naturales de tierra provenientes generalmente de bosques. Estos sustratos son utilizados para la propagación de plantas de ornato y jardinería.
- El lodo y la composta, aplicados en porcentajes agronómicos, pueden proporcionar los requerimientos de nutrimentos esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio necesarios para los cultivos, por lo que se reduciría el uso de fertilizantes químicos.
- El uso de biosólidos como abono orgánico protege el acuífero debido a que el nitrógeno contenido en el lodo está enlazado a la materia orgánica, de esta forma es menos contaminante que el de fertilizantes químicos.

Se recomienda continuar analizando el comportamiento de este método de composteo y complementarlo con otros estudios que permitan evaluar su potencial nutrimental. También es necesario evaluar si las condiciones climáticas afectan los procesos de mineralización y absorción en los suelos y cultivos donde se apliquen con el objeto de establecer las dosis de aplicación de los biosólidos de manera controlada. En el Estado de Quintana Roo, principalmente en la zona norte, existe la demanda de suelos y biosólidos para su uso en áreas de ornato, sembrado de pasto y de paisaje, por lo que el composteo de lodos residuales ofrece ser un método para satisfacer la demanda de las zonas agrícolas y turísticas.

En materia legal, se recomienda la elaboración y aprobación de una nueva Norma Oficial Mexicana (la NOM-005-SEMARNAT-2008) que regule las Especificaciones de Protección Ambiental para el uso y aplicación de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales; la cual deberá establecer: las guías prácticas de manejo,

alternativas en la reducción de patógenos, restricciones de uso y aplicación de biosólidos para las cosechas de diferentes tipos de cultivo, césped, pastoreo de animales, para el contacto al público y las demás que resulten aplicables. Esta Norma deberá estar en concordancia con la Norma 40 part 503 del Código Federal de Regulaciones (CFR) de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos (E.U.) y con la Normatividad vigente en los países de la Unión Europea (U.E.), debido a que en estos países se tiene la experiencia de más de 25 años en el aprovechamiento de lodos y biosólidos.

## **CAPITULO 5. Referencias bibliográficas**

- Cardoso V. Lina. (2000). Aplicación de lodo residual en agricultura. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. 52 pag.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de Agua Potable y Alcantarillado, Libro II, Sección: Potabilización y Tratamiento “Guía para el manejo, tratamiento y disposición de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales”. Gerencia de Ingenierías y Normas Técnicas. CONAGUA. 267 pag.
- Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA), (2005). “Estudio para la Evaluación de la Calidad Analítica de los Lodos Producidos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado. Planta Primer Centenario”. 175 pag.
- Zayas, J. (2003). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). “Curso Teórico-Práctico: Tratamiento de Lodos Residuales”, Material Tecnológico. 310 pag.
- FUJITA, K. (2004). “Técnica de Compostaje”, Vol. II 3-3, Agencia de Cooperación Internacional del Japón. Ed. GIHODO. 29 pag.
- Crites, R., & Tchobanoglous, (2000). “Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y descentralizados”, Tomo III. Ed. McGraw Hill. 703-1082 pag.
- Metcalf & Eddy, (2000). “Ingeniería de Aguas Residuales”, Tomo II. 3ª edición. Ed. McGraw-Hill. 703-1082 pag.
- Moeller, G., Sandoval, L., Cardoso, L., Escalante, V. (2005). “Memorias del curso de operación de plantas de tratamiento de lodos activados” Material Tecnológico. 2ª edición. IMTA. 300 pag.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. DOF 15 de agosto de 2003. 35 pag.
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. DOF 23 de junio de 2006. 32 pag.

- NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. DOF 31 de diciembre de 2002. 73 pag.
- Ramalho, R. (1991). “Tratamiento de aguas residuales”. 2ª edición. Ed. REVERTE. 950 pag.

### **Páginas Web visitadas**

- <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?s=est&c=10395> (28-02-2008).
- <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/LIBROS.pdf> (30-05-2008)
- <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/499/experiencias.html> (10-06-2008)

**A N E X O**

**I**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA**

- Nombre:** **Cinética Química S.A. de C.V.**
- Dirección:**
  - **OFICINA:** Av. Ruiz Cortines No. 915 Ote. Col. Vidriera Monterrey, N.L.
  - **PLANTA:** Av. Industrias de Acero con Ind. De la Fundición Parque Industrial Ciénega de Flores , N.L.
- Teléfonos de información:**
  - (01) 83 510422 Fax No. (01) 83 515841
  - (01) 825-2380454 Fax No: (01) 825-2380849

**2. DATOS GENERALES DE LA SUSTANCIA**

- Nombre Comercial:** **POLY + CAT – C5450-2**
- Familia Química :** **acrilamida catiónica**
- Formula molecular:** **Poliacrilamida**

**3. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS**

- Estado Físico:** **Sólido granular**
- Olor:** **Ninguno**
- Color:** **Blanco**
- Solubilidad en agua:** **Altamente soluble**
- Material Volátil:** **N/A**
- Rango de pH :** **De 3 - 5 en solución al 5 %**
- Estabilidad:** **Bajo condiciones normales**

**4. INFORMACIÓN SOBRE FUEGO Y EXPLOSIÓN**

- Procedimiento de ataque contra el fuego:**
  - **Utilizar agua, bióxido de carbono o un agente químico seco**
  - **Es posible que el agua en chorro no sea eficaz**

## 5. RIESGOS PARA LA SALUD

- **Por exposición Aguda**
  - **Ingestión : Ligeras Excoriaciones, Boca y Laringe**
  - **Inhalación: Ligeros Daños al Sistema Respiratorio.**
  - **Piel (Contacto y Absorción): Puede Producir Ligera Irritación**
  - **Ojos: Quemaduras locales e irritación.**

**Propiedades Toxicológicas Agudas: No Disponible**

## 6. EMERGENCIA PRIMEROS AUXILIOS

- **Contacto con los ojos : Lavar con abundante agua limpia durante 15 minutos, obtenga atención médica.**
- **Contacto con la piel : Lavar con agua en abundancia y después con un poco de Solución Jabonosa.**
- **Ingestión: No induzca al vomito, obtenga atención médica.**
- **Inhalación: Llevar al paciente a un lugar ventilado, Obtenga atención médica.**

## 7. INDICACIONES EN CASO DE FUGA O DERRAME

- **La solución de estos convierten a la superficie donde se derraman en zonas extremadamente resbalosas, acordonar el área y contenga los derrames usando material absorbente (Arena ,aserrín, tierra)**  
**Los lodos resultantes deberán ser confinados , si se almacena en tanques, construya diques de contención si se requiere, solicitar asistencia para su disposición.**

## 8. PROTECCIÓN PERSONAL

- **Equipo de protección:**
  - **Respiratoria: Ninguna**
  - **En los ojos : Lentes**
  - **En las manos: Guantes de hule**
  - **En el cuerpo: Bata u overol.**

**HOJA DE SEGURIDAD DE MATERIALES  
MATERIAL SAFETY DATA SHEET**

Página: 3 de 4  
Revisión: 01  
Fecha: Ene-01

**9. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTACIÓN**

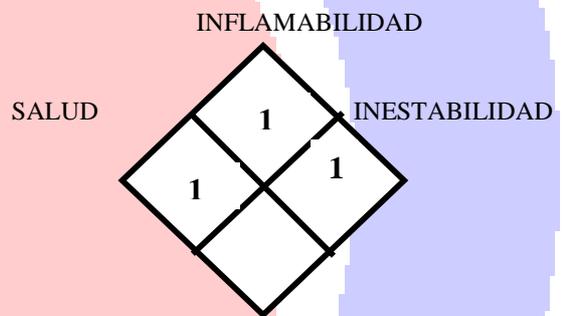
- El Poly + Cat – C5450-2 se transporta en sacos con 25 Kg. c/ u, los cuales deben de estar perfectamente cerrados y sin fugas de ninguna clase, en condiciones de uso normal los sacos deberán estar marcados con el producto que contienen, numero de lote y además llevaran la etiqueta del código NFPA correspondiente.

**10. PRECAUCIONES ESPECIALES**

- El producto debe manejarse con precaución evitando cualquier tipo de derrames
- Almacenarse de preferencia bajo techo , en un lugar fresco y ventilado.

<b>Poly + Cat –C 5450-2</b>	
<b>SALUD</b>	
<b>LIGERAMENTE PELIGROSO</b>	<b>1</b>
<b>INFLAMABILIDAD</b>	
<b>ARRIBA DE 94 ° C</b>	<b>1</b>
<b>INESTABILIDAD</b>	
<b>SOLO SI ES CALENTADO</b>	<b>1</b>

**CÓDIGO NFPA**



MANÉJESE CON LENTES Y GUANTES DE HULE BATAS Y OVEROL

**OBSERVACIONES**

- Cinética Química S. A de C.V. confía en que la información técnica y las recomendaciones contenidas en esta hoja de datos son exactas. Pero se establecen sin ninguna garantía expresada o implicada

**HOJA DE SEGURIDAD DE MATERIALES  
MATERIAL SAFETY DATA SHEET**

Página:	4 de 4
Revisión:	01
Fecha:	Ene-01

**El vendedor no asume responsabilidad alguna por daños o lesiones que sufra el comprador o terceras personas a consecuencia del uso de este material.**

**A N E X O**  
**II**

**A N E X O**  
**III**

CONVENIO DE COLABORACIÓN INSTITUCIONAL PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO "ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SU ESTABILIZACIÓN PARA USARLOS COMO BIOSÓLIDOS MEJORADORES DE SUELOS Y ZONAS AGRÍCOLAS", QUE CELEBRAN POR UNA PARTE LA COMISIÓN DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, REPRESENTADA POR SU DIRECTOR GENERAL, ING. ANDRES F. RUIZ MORCILLO, EN LO SUCESIVO "CAPA"; Y POR OTRA PARTE; EL COLEGIO DE LA FRONTERA SUR, REPRESENTADO EN ESTE ACTO POR SU DIRECTOR GENERAL DR. JOSÉ PABLO LIEDO FERNÁNDEZ, EN LO SUCESIVO "ECOSUR"; MISMO QUE SE REALIZA AL TENOR DE LAS SIGUIENTES ANTECEDENTES, DECLARACIONES Y CLÁUSULAS:

### ANTECEDENTES

1. Considerando que el Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Estado de Quintana Roo (FOMIX Quintana Roo), aprobó en su más reciente convocatoria el Proyecto: "Estudio de la calidad de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y su estabilización para usarlos como biosólidos mejoradores de suelos y zonas agrícolas", con la clave de Proyecto: "QROO-2006-C01-55927";
2. Considerando que una parte importante del Proyecto es la participación de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA.) del gobierno del Estado, no sólo para aportar espacio y facilidades para el material a ser bioprocesado, sino como un destinatario y usuario natural del Proyecto;
3. Reconociendo la importancia de impulsar y potenciar la cooperación entre las instituciones, en materia de conocimiento, investigación, información, tecnología, uso sustentable, educación y difusión;

Las partes están interesadas en suscribir el presente convenio de colaboración y unir los esfuerzos necesarios para darle cumplimiento al mismo, de acuerdo a las siguientes

### DECLARACIONES

#### I.- DECLARA "CAPA"

I.1.- Que es un organismo público descentralizado de naturaleza mixta estatal y municipal, creado mediante decreto publicado en el periódico oficial del gobierno del estado, en fecha seis de octubre de mil novecientos ochenta y uno, con personalidad jurídica y patrimonio propio en los términos de los artículos 18 de la Ley de agua potable y alcantarillado, 3°, 7°, 43, 47,48, y 49 de la Ley orgánica de la administración pública 1, 2, 10, 15, y 21, de la Ley de las Entidades de la

*Andrés Fello.*

Administración Pública paraestatal ordenamientos todos del Estado de Quintana Roo;

**I.2.-** Que entre su objetivo se encuentran entre otros planear, construir, rehabilitar, ampliar, operar, conservar y mejorar los sistemas de agua potable, agua desalada, alcantarillado, y tratamiento y reuso de aguas residuales, así como realizar los estudios y proyectos que sean necesarios para tal fin.

**I.3.-** Que en este acto se encuentra representada por el Ing. Andrés F. Ruiz Morcillo, en su carácter de Director General en los términos del Canon 33 de la Ley de Agua Potable y Alcantarillado y 29 de la Ley de las Entidades de la Administración Pública; ambos ordenamientos del estado de Quintana Roo.

**I.4.-** Que para efectos del presente Convenio, señala como domicilio, el predio ubicado en la avenida Efraín Aguilar no. 210, Colonia Centro, Chetumal, Quintana Roo.

## **II.- DECLARA "ECOSUR":**

**II.1.-** Que es un organismo descentralizado de interés público, con personalidad jurídica patrimonio propio, creado por Decreto del Ejecutivo Federal expedido el 2 de diciembre de 1974 bajo el nombre de Centro de Investigaciones Ecológicas del Sureste, siendo reformado cambiando a su denominación actual por Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de octubre de 1994 y reestructurado por Decreto publicado el 29 de agosto de 2000 y el 12 de octubre de 2006, respectivamente siendo reconocido como Centro Público de Investigación, mediante resolución publicada en el propio órgano oficial, el 11 de septiembre de 2000.

**II.2.-** Que su objetivo es realizar actividades de investigación científica básica y aplicada en materias que incidan en el desarrollo y la vinculación de México en su frontera sur, dando especial relevancia a su problemática ambiental, económica, productiva y social, así como desarrollar tecnologías y diseñar estrategias que contribuyan al bienestar social, a la conservación de la biodiversidad, al uso racional, eficiente y sostenido de los recursos naturales, y en general, al desarrollo sustentable.

**II.3.-** Que el Dr. José Pablo Liedo Fernández, acredita su nombramiento como Director General mediante Escritura Pública 8575, volumen 191, otorgada ante la fe de la Lic. Ana María del Socorro Sarmiento Ochoa, Notario Público No. 15, en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, del día 19 de abril de 2004; y está facultado para suscribir el presente convenio, en los términos del artículo 59 fracción I de la Ley Federal de las Entidades Paraestatales.

**II.4.-** Que su Registro Federal de Contribuyentes es: CFS-941020-BZ5.

**II.5.-** Que para efectos del presente convenio señala como domicilio operativo el ubicado en Av. Centenario km. 5.5 C. P. 77014, Chetumal, Quintana Roo. Y como

domicilio legal el ubicado en carretera antiguo Aeropuerto km 2.5, Código Postal. 30700, Tapachula, Chiapas, México.

Expuesto lo anterior, las partes sujetan sus compromisos a la forma y términos que se establecen en las siguientes:

## CLÁUSULAS

**PRIMERA.- OBJETO.** El presente Convenio tiene por objeto establecer los mecanismos y compromisos entre las partes, que permitan la ejecución del proyecto "Estudio de la calidad de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y su estabilización para usarlos como biosólidos mejoradores de suelos y zonas agrícolas"

**SEGUNDA.-** Para la consecución del presente Convenio, "CAPA" y "ECOSUR" convienen en la medida de sus posibilidades, en la realización de las siguientes acciones de cooperación:

A).- Actividades de planeación, investigación, análisis, obtención y compilación de información.

B).- Intercambio de información sobre el propio desarrollo del Proyecto objeto de este Convenio.

C).- Asegurar la participación de ambas Instituciones para asistir a las reuniones de trabajo sobre la planeación, monitoreo y evaluación de las pruebas y estudios diseñados.

**TERCERA.- COMPROMISOS DE "ECOSUR".** Para el cumplimiento de las actividades establecidas en el proyecto citado en la primera cláusula, "ECOSUR" a través del recurso aprobado por los Fondos Mixtos de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica, otorga los rubros previstos en la siguiente tabla:

Concepto	Monto
Material y construcción de una plataforma de composteo.	35,000.00
Equipos para la plataforma de composteo (1 picadora de martillo y 1 soplador de aire con aditamentos)	62,735.50
Honorarios por servicios profesionales / 1 persona / 6 meses	31,855.50
Beca 1 estudiante /12 meses	35,762.40
Total	166,617.90

"ECOSUR" destinará la cantidad de \$ 35,000.00 (treinta y cinco mil pesos 00/100 M. N.) (incluyendo IVA) por concepto de anticipo y primera parte del pago a una firma contratista para construir una plataforma de composteo con una superficie de 200 m<sup>2</sup>, que estará ubicada en las instalaciones de la Planta de Tratamiento "El Centenario" de la ciudad de Chetumal.

**CUARTA.- COMPROMISOS DE "CAPA".** Para el cumplimiento de las actividades establecidas en este Convenio, la "CAPA" manifiesta su conformidad para aportar en especie los siguientes conceptos a favor del Proyecto:

*Rmader Fello.*

CONCEPTO	CANTIDAD
Material y construcción de una plataforma de composteo	35,000.00
Herramienta menor (carretilla, rastrillo, machete, pala)	1 de cada uno
Equipo básico de seguridad (Casco, botas de hule, guantes de carnaza, protector de ojos, protector de oídos, botas de hule, faja)	1 de cada uno
Aditamentos para la instalación de los equipos (Picadora de martillo y soplador)	Según requerimiento
Suministro de energía eléctrica y gasolina para la operación programada de los equipos instalados	Según consumo

El complemento y pago del 50% restante del costo de la obra civil para la plataforma de composteo mencionada en la Cláusula anterior, será aportado por la "CAPA" \$ 35,000.00 (treinta y cinco mil pesos 00/100 M. N.) (incluyendo IVA).

Dadas las características normativas en seguimiento a un proceso eventual de licitación en obra civil en terrenos de "CAPA", el contrato para la ejecución de obra civil, será firmado por la "CAPA" con la firma contratista que el mismo designe, derivado de lo cual las garantías de cumplimiento de contrato, por los anticipos otorgados y demás obligaciones contractuales deben ser constituidas en favor de "CAPA".

**QUINTA.- "CAPA" Y "ECOSUR"** se obligan a ejecutar los trabajos de colaboración en cumplimiento con el calendario de actividades que se establece en el Protocolo del Proyecto "QROO-2006-C01-55927", objeto de este Convenio en un plazo no mayor de doce meses, los cuales se inician a partir de la fecha de la firma,

**SEXTA.-** El objeto materia del presente Convenio podrá ser ampliado o modificado libremente por acuerdo y por escrito debidamente firmado entre las partes, el cual se incorporará como anexo del presente instrumento legal.

**SEPTIMA.-** La vigencia del presente Convenio de Colaboración iniciará a partir de su firma y concluirá en doce meses. Sin embargo, las Partes acuerdan que por motivos propios de la naturaleza de la relación de trabajo formal que se inicia, existe la posibilidad de prorrogar el presente Convenio, sin menoscabo de cumplir en lo conducente con los compromisos de cada una de las Partes descritos en las Cláusulas Segunda, Tercera, Cuarta y Quinta. Dicha prórroga se establecerá y definirá con anticipación a la finalización de la vigencia de este Documento y formará parte integral del presente Convenio como addendum.

**OCTAVA.-** Las partes acuerdan que el personal o los miembros de cada una de ellas que sean designados para la realización de cualquier acción, continuará en forma absoluta bajo la dirección o dependencia de la parte con la que tenga establecida su relación laboral, independientemente de estar prestando sus servicios en las instalaciones de la parte a la que fue asignada, por ende, cada una de ellas asumirá su responsabilidad por este concepto y en ningún caso se considerarán patrones solidarios o sustitutos. Si en la realización de las actividades

*Enrique Sella*

interviene personal que preste sus servicios a instituciones o personas distintas a las partes, éste continuará siempre bajo la dirección y dependencia de dicha institución o persona, por lo que su intervención no originará relación de carácter laboral ni con "CAPA", ni con "ECOSUR".

**NOVENA.-** Queda expresamente pactado que "CAPA" y "ECOSUR" no tendrán responsabilidad civil por los daños y perjuicios que se pudieran causar como consecuencia de casos fortuitos o de fuerza mayor, particularmente por huelgas o suspensión de labores académicas o administrativas que originen el retraso o la cancelación del proyecto objeto de este Convenio, acordándose que al desaparecer dichas causas de fuerza mayor o de casos fortuitos, inmediatamente se reanudará el cumplimiento de las obligaciones que se hubiesen establecido.

**DÉCIMA.-** "CAPA" y "ECOSUR" convienen en que las publicaciones tales como artículos, folletos o cualquier otro artículo de divulgación, así como la difusión que resulte del objeto del Convenio, se realizará de común acuerdo. Así mismo, estipulan que los Derechos de Autor y de patente que se deriven del presente Convenio de Colaboración, que sean resultado de las actividades mencionadas en la Cláusula Primera y que dé origen a publicaciones científicas, tecnológicas o libros susceptibles de protección legal, así como la titularidad de los derechos patrimoniales, corresponderá a la Parte cuyo personal haya realizado el trabajo objeto de la investigación, o a las partes que de común acuerdo y en proporción a sus aportaciones realizaron el trabajo, dándole el debido reconocimiento a quienes hayan intervenido en la realización del mismo.

Para efectos de lo señalado en el párrafo que antecede, "CAPA" y "ECOSUR" acuerdan acatar y sujetarse, en lo conducente, a las disposiciones contenidas en la Ley Federal del Derecho de Autor vigente.

**DÉCIMA PRIMERA.-** Este Convenio es producto de la buena fe. Todo conflicto que resulte de su ejecución, interpretación y cumplimiento, las partes convienen en someterlo a la jurisdicción de los Tribunales Federales de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo renunciando expresamente a cualquier otro que por razón de fuero o competencia les pudiera corresponder conforme a sus domicilios presentes o futuros.

**LEIDO QUE FUE Y ENTERADAS LAS PARTES DEL CONTENIDO Y ALCANCE LEGAL DEL PRESENTE INSTRUMENTO JURÍDICO, LO FIRMAN DE CONFORMIDAD EN LA CIUDAD DE CHETUMAL EL 30 DE ABRIL DEL 2007.**



**FIRMAS**

**POR LA COMISIÓN DE AGUA  
POTABLE Y ALCANTARILLADO  
CAPA**

**POR EL COLEGIO DE LA  
FRONTERA SUR  
ECOSUR**

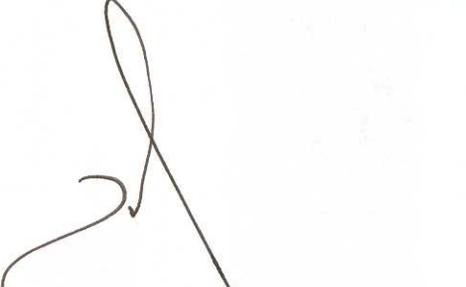


**COMISION DE AGUA POTABLE  
Y ALCANTARILLADO DEL GOBIERNO  
DE QUINTANA ROO  
DIRECCION GENERAL  
ING. ANDRÉS F. RUÍZ MORCILLO  
DIRECTOR GENERAL**



**DR. JOSÉ PABLO LIEDO FERNÁNDEZ  
DIRECTOR GENERAL**

**TESTIGOS**



**C. P. ENRIQUE ALONSO ALCOCER  
GERENTE DE CAPA EN OTHÓN P. BLANCO**



**DR. ALBERTO DE JESÚS NAVARRETE  
DIRECTOR DE UNIDAD CHETUMAL**

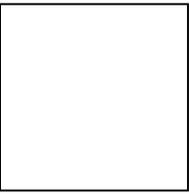


**ING. ROBERTO CHIM INTERIÁN  
COORDINADOR OPERATIVO DE CAPA**



**DRA. ELIZABETH MIRANDA TELLO  
DIRECTORA DEL PROYECTO FOMIX**

*NOTA: LAS FIRMAS QUE ANTECEDEN FORMAN PARTE DEL CONVENIO DE COLABORACION ENTRE CAPA Y ECOSUR, PARA EJECUTAR EL PROYECTO "ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LODOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y SU ESTABILIZACION PARA USARLOS COMO BIOSOLIDOS MEJORADORES DE SUELOS Y ZONAS AGRICOLAS"*



**A N E X O**  
**I V**

PARÁMETROS	UNIDAD	A (fresco 100%)	RESULTADOS ALCANZADOS EN 8 MEZCLAS EXPERIMENTALES (TIPOS DE COMPOSTA)							
			Nº 1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8
			A+C (1:1)	A+B (1:1)	A+D (1:1)	A+C (2:1)	A+B (2:1)	A+D (2:1)	A+B+C (1:1:1)	A+B+C (1:2:1)
Potasio	Cmol/kg	3.29	17.16	6.84	4.39	11.42	6.17	4.88	12.22	14.2
Magnesio	Cmol/kg	13.68	12.16	10.25	10.78	13.7	14.61	12.02	10.64	10.06
Calcio	Cmol/kg	36.71	31.87	34.34	35.29	25.31	43.09	32.63	28.78	26.21
Sodio	Cmol/kg	2.99	5.83	4.62	3.8	5.43	4.62	4.36	5.53	5.31
Hierro	mg/kg	163.79	172.64	126.23	122.53	167.18	271.58	165.83	325.95	192.85
Cobre	mg/kg	87.58	61.94	77.38	59.25	73.53	91.48	80.73	43.48	44.06
Manganeso	mg/kg	15.08	17.46	17.63	14.1	15.1	21.4	18.3	24.93	37.31
Zinc	mg/kg	191.16	152.46	139.05	118	183.23	204.6	174.15	120.08	112.01
D.A.	gr/ml	0.77	0.6	0.57	0.45	0.72	0.67	0.47	0.51	0.55
pH	H2O	6.33	6.48	5.93	5.82	6.29	6.03	5.78	6.64	6.99
C.E.	mS/cm	6.1	7.3	7.3	6.5	4.8	7.5	6.9	4.7	3.8
N total	%	2.89	2.54	2.66	2.66	2.85	2.81	3.12	2.35	2.16
M.O.	%	26.11	31.83	29.33	37.91	30.4	29.33	31.11	34.33	36.48
CIC	Cmol/kg	171.4	281.4	177.8	165.9	152.1	165.9	152.1	173.2	162.2
CaCO3	%	15.95	16.9	16.6	13.4	16.45	16.4	15.65	17.25	17.4
NO3	mg/kg	4277.8	3831.2	5710.2	7347.1	1697.7	6243.4	7308.6	2094.5	1265.2
NH4	mg/kg	871.1	130.9	320.1	415.4	299.9	297.1	1751.4	110.2	55.1
P(Olsen)	mg/kg	872.1	907	943.4	810.9	853.1	678.5	991.4	642.1	661
P(vegetal)	%	2.37	1.65	1.91	2.08	2.15	2.15	2.41	1.33	1.24
P(vegetal)	Cmol/kg	76.4	53.1	61.5	67.1	69.4	69.4	77.8	42.8	40

A= LODO B=BAGAZO C=PODA D=ASERRIN

	cmol/kg	cmol/kg	cmol/kg	cmol/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	gr/ml	H <sub>2</sub> O	mS/cm	%	%	cmol/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	
Localidades	potasio	magnesio	calcio	sodio	hierro	cobre	manganeso	zinc	D.A.	PH	CE	N	M.O.	CIC	CaCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	P (Olsen)	arena
Pucté	0.5797	1.8259	8.5360	0.1720	36.0784	3.0937	153.2273	3.3337	1.205	7.25	0.063	0.225	3.65	23.80	2.00	1.30	10.30	5.40	16.80
Francisco botes	2.5808	1.9812	21.1389	0.1024	26.3945	2.7224	90.2017	1.7774	1.265	7.65	0.129	0.290	4.30	40.30	6.20	3.85	12.60	2.85	16.80
Sacxan	1.1950	2.1493	15.1290	0.0980	19.2821	1.8150	99.9805	1.6275	1.220	7.75	0.167	0.165	4.30	37.55	2.90	3.45	8.60	5.25	21.80
Juan sarabia	3.7466	2.6933	25.8544	0.2345	20.6381	1.6573	39.5743	1.4174	1.170	7.55	0.246	0.265	4.45	35.70	13.55	17.65	9.40	10.50	18.80
Cocoyol	0.8167	2.7560	20.7646	0.3014	35.5482	2.0698	111.2718	1.4099	1.220	7.55	0.174	0.150	3.75	41.25	3.35	3.70	10.50	3.00	6.80
Palmar	1.5105	1.9688	18.9370	0.1175	14.4060	1.5598	42.8957	1.6123	1.155	8.35	0.163	0.265	5.25	34.40	20.35	16.25	6.70	8.50	16.80
Allende	2.0821	2.9180	21.5443	0.1306	11.1219	1.2749	49.5049	0.9224	1.240	7.80	0.163	0.210	4.40	34.85	18.05	4.50	6.25	5.75	18.80
Cacao	0.9134	1.8978	23.8553	0.4719	26.1056	2.0099	106.9422	1.1399	1.190	8.05	0.223	0.300	5.15	38.95	13.20	7.15	10.20	11.25	9.80
Ramonal	2.3098	2.8182	21.0047	0.3020	11.1219	1.0799	34.8508	0.7874	1.170	8.45	0.184	0.280	5.00	34.85	21.90	21.20	6.85	19.35	26.80
Obregón	0.7905	1.4135	9.4249	0.1187	18.7410	2.5198	179.8713	1.3499	1.230	7.90	0.114	0.135	3.85	24.75	4.20	1.55	5.45	11.05	16.80
Sabidos	2.2477	2.1375	24.4604	0.1299	10.9639	1.2827	37.1138	1.5748	1.180	8.40	0.170	0.190	5.40	44.90	16.45	6.25	5.25	6.80	22.80
Sergio butrón casas	0.8808	3.6929	32.1465	0.3831	26.1769	1.8036	22.3408	0.6149	1.215	7.97	0.144	0.135	2.55	53.62	10.05	2.60	9.65	7.35	5.80
Cachaza	2.5210	8.0583	25.8794	0.7222	72.2350	5.4550	82.9300	13.0100		8.20		0.790		81.60	6.00	2.80	10.50	468.60	

No de lab	Unidades/Determinación	cmol/kg	cmol/kg	cmol/kg	cmol/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	gr/ml	H <sub>2</sub> O	mS/cm	%	%	cmol/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
	Compostas	potasio	magnesio	calcio	sodio	hierro	cobre	manganeso	zinc	D.A.	PH	CE	N total	M.O.	CIC	CaCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	P (Olsen)	P (vegetal)
178	A+C (1:1)	10.1355	13.5288	32.0359	3.8309	238.5686	76.3312	40.9072	241.2435	0.450	5.93	5.70	2.620	30.40	124.60	16.73	3953.80	213.00	898.30	1.803
179	A+B (1:1)	4.3855	14.4033	44.4361	3.8141	141.3665	88.0197	36.7727	262.4092	0.510	5.49	7.50	2.770	27.18	115.50	16.73	6511.20	299.30	1020.50	2.078
180	A+B+C (1:1:1)	9.8491		30.1896	4.3326	146.1441	67.2723	46.8731	228.2408	0.530	6.25	4.70	2.500	32.19	123.70	16.88	1817.60	115.50	968.10	1.645
181	A+C (2:1)	6.2826	13.8477	41.5793	3.4370	136.7417	77.4453	28.6732	257.8595	0.590	5.70	6.50	1.620	30.04	111.80	16.88	7743.20	262.50	940.50	1.948
182	A+B (2:1)	3.3414	10.2263	33.8822	2.3804	216.1620	116.6929	66.4460	350.9789	0.660	5.57	5.80	2.960	29.33	93.50	16.93	5446.60	300.80	1061.30	2.121
183	A+B+C (1:1:2)	6.5473	12.4280	37.4376	2.7476	148.7250	87.1000	54.0000	287.3750	0.570	5.78	4.90	2.960	26.82	104.50	16.98	5305.50	229.10	978.30	1.876
184	A+B+C (1:2:1)	6.1937	10.5967	30.6138	2.6446	175.5394	76.5954	75.6204	264.2341	0.570	6.40	2.60	2.700	32.19	107.20	17.23	1412.70	81.00	928.80	1.688
185	A+B+C(2:1:1)	17.6826	11.8210	25.9543	3.6135	157.8280	70.3059	74.3558	271.5517	0.510	6.93	3.40	2.810	32.55	130.10	16.98	652.80	63.20	1137.00	1.413
186	A+C (1:1)	17.1611	12.1605	31.8675	5.8326	172.6375	61.9375	17.4625	152.4625	0.600	6.48	7.30	2.540	31.83	281.40	16.90	3831.20	130.90	907.00	1.645
187	A+B (1:1)	6.8389	10.2469	34.3438	4.6217	126.2250	77.3750	17.6250	139.0500	0.570	5.93	7.30	2.660	29.33	177.80	16.60	5710.20	320.10	943.40	1.905
188	A+D (1:1)	4.3913	10.7819	35.2919	3.8011	122.5250	59.2500	14.1000	118.0000	0.450	5.82	6.50	2.660	37.91	165.90	13.40	7347.10	415.40	810.90	2.078
189	A+C (2:1)	11.4175	13.7037	25.3119	5.4348	167.1750	73.5250	15.1000	183.2250	0.720	6.29	4.80	2.850	30.40	152.10	16.45	1697.70	299.90	853.10	2.150
190	A+B (2:1)	6.1675	14.6091	43.0888	4.6185	271.5750	91.4750	21.4000	204.6000	0.670	6.03	7.50	2.810	29.33	165.90	16.40	6243.40	297.10	678.50	2.150
191	A+D (2:1)	4.8836	12.0165	32.6347	4.3587	165.8250	80.7250	18.3000	174.1500	0.470	5.78	6.90	3.120	31.11	152.10	15.65	7308.60	1751.40	991.40	2.410
192	A+B+C (1:1:1)	12.2193	10.6379	28.7788	5.5283	325.9500	43.4750	24.9250	120.0750	0.510	6.64	4.70	2.350	34.33	173.20	17.25	2094.50	110.20	642.10	1.327
193	A+B+C (1:2:1)	14.1975	10.0617	26.2101	5.3081	192.8500	44.0625	37.3125	112.0125	0.550	6.99	3.80	2.160	36.48	162.20	17.40	1265.20	55.10	661.00	1.240
194	A	3.2855	13.6831	36.7078	2.9913	163.7875	87.5750	15.0750	191.1625	0.770	6.33	6.10	2.890	26.11	171.40	15.95	4277.80	871.10	872.10	2.367

A= LODO B=BAGAZO C=PODA D=ASERRIN

arcilla	limo	nombre textural
64.20	19	arcilloso
60.20	23	arcilloso
57.20	21	arcilloso
58.20	23	arcilloso
70.20	23	arcilloso
51.20	32	
49.20	32	
66.20	24	arcilloso
47.20	26	arcilloso
61.20	22	arcilloso
56.20	21	arcilloso
79.20	15	arcilloso

cmol/kg
<b>P (vegetal)</b>
58.20
67.10
53.10
62.90
68.50
60.60
54.50
45.60
53.10
61.50
67.10
69.40
69.40
77.80
42.80
40.00
76.40

TABLA 4-1 VARIACIONES EN LA TEMPERATURA A LO LARGO DEL PROCESO DE COMPOSTEO EN EXPERIMENTOS REALES

Fecha	Nº de día	Mezcla 1 T °C	Mezcla 2 T °C	Mezcla 3 T °C	Mezcla 4 T °C	Mezcla 5 T °C	Mezcla 6 T °C	Mezcla 7 T °C	Mezcla 8 T °C
26/12/2007	1	31.10	40.40	29.80	32.00	29.20	31.90	35.15	39.00
27/12/2007	2	46.00	38.80	45.45	31.50	41.20	31.00	42.45	45.00
28/12/2007	3	45.80	41.80	41.80	31.70	41.80	31.50	49.00	50.90
29/12/2007	4	45.95	44.60	46.50	45.50	49.30	44.40	52.10	56.70
30/12/2007	5	45.20	41.20	46.70	50.10	52.30	48.30	55.60	59.00
31/12/2007	6	45.80	45.00	46.80	51.40	50.00	50.20	56.00	57.60
01/01/2008	7	41.20	43.20	49.70	51.20	49.50	50.10	56.20	58.30
02/01/2008	8	38.95	39.85	43.95	48.05	50.60	51.05	69.80	66.40
03/01/2008	9	37.55	41.50	43.25	44.05	51.50	46.15	63.90	64.25
04/01/2008	10	41.55	46.50	48.60	48.80	55.30	49.10	64.00	66.00
05/01/2008	11	40.00	43.80	51.00	54.00	54.90	51.50	66.00	67.90
06/01/2008	12	42.90	44.30	53.00	56.80	57.00	55.00	67.10	68.00
07/01/2008	13	42.70	43.50	55.00	60.00	62.60	54.30	65.00	65.40
08/01/2008	14	40.50	43.70	52.00	58.00	64.00	52.50	62.00	63.00
09/01/2008	15	36.80	38.80	51.00	55.00	61.00	53.00	59.00	61.00
10/01/2008	16	37.00	39.00	51.60	47.70	52.00	53.00	53.00	55.70
11/01/2008	17	36.95	40.40	49.00	45.00	48.00	52.00	48.00	55.00
12/01/2008	18	36.15	38.80	50.00	48.00	49.00	51.00	49.00	53.00
13/01/2008	19	39.25	43.10	54.00	50.00	51.00	52.00	53.00	54.00
14/01/2008	20	33.50	40.80	52.00	45.00	47.00	50.00	53.00	55.00
15/01/2008	21	41.20	43.60	44.50	44.50	41.50	43.50	47.50	47.50
16/01/2008	22	34.40	44.30	44.00	41.00	40.00	42.00	45.00	46.00
17/01/2008	23	40.50	47.10	44.00	45.00	35.00	40.00	43.00	41.00
18/01/2008	24	44.95	44.05	39.00	40.00	37.00	38.00	41.00	45.00
19/01/2008	25	42.90	35.10	39.00	41.00	39.00	40.00	39.00	45.00
20/01/2008	26	47.00	45.10	38.00	40.00	38.00	39.00	40.00	42.00
21/01/2008	27	46.50	45.00	38.20	40.50	38.20	38.90	40.10	41.50
22/01/2008	28	46.00	44.90	38.00	40.10	38.30	38.80	39.30	41.00

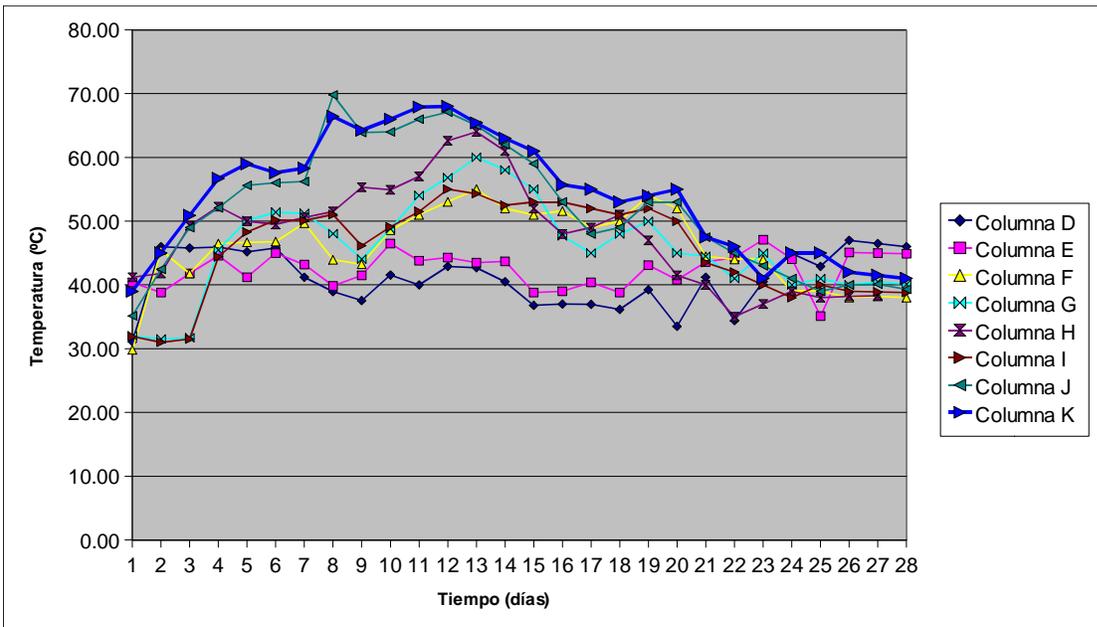
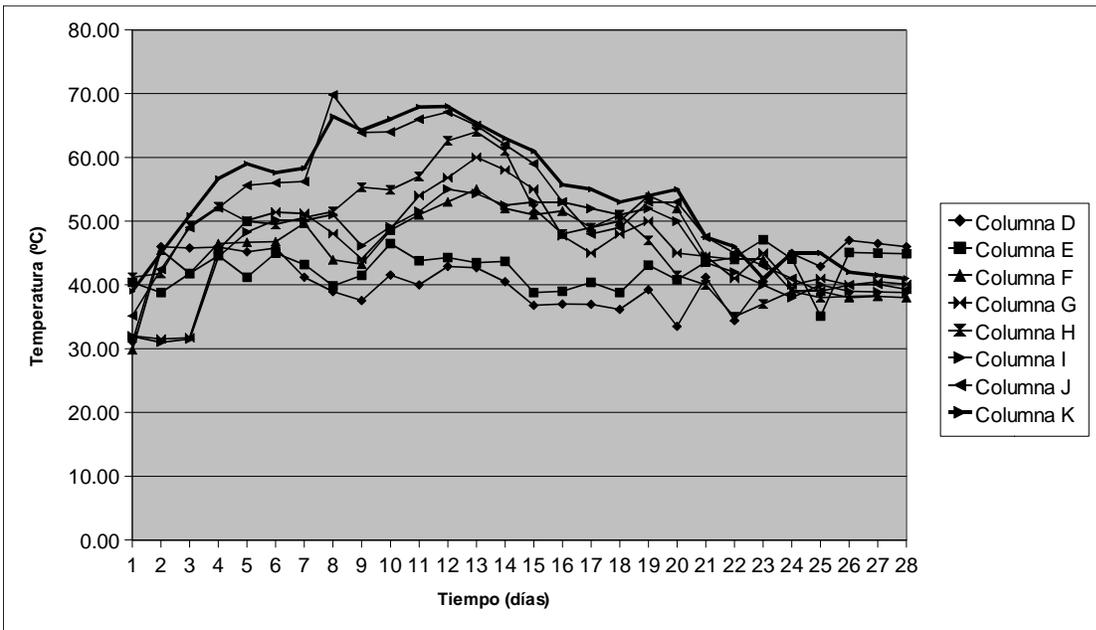
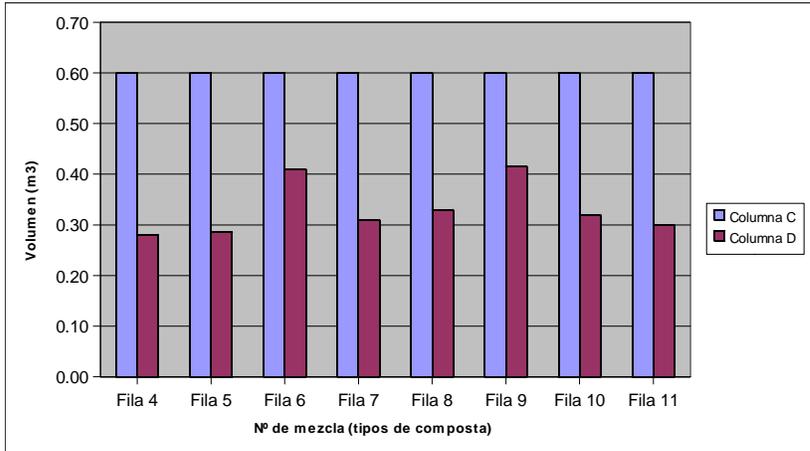


TABLA 4-1 VARIACIONES EN LA TEMPERATURA A LO LARGO DEL PROCESO DE COMPOSTEO EN EXPERIMENTOS REALES

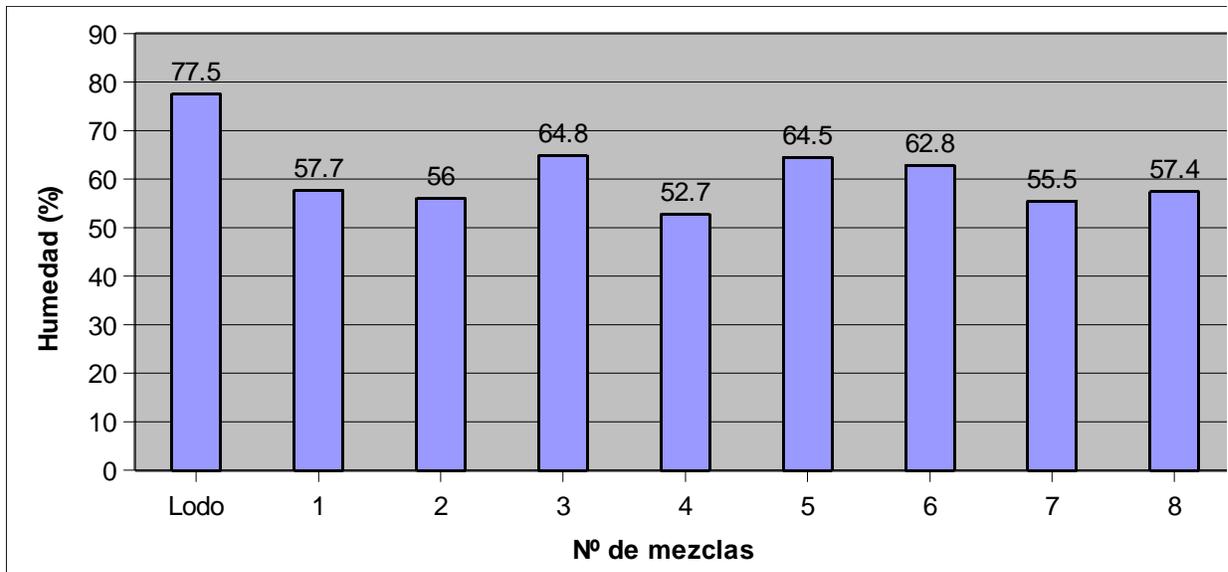
Fecha	Nº de día	Mezcla 1 T °C	Mezcla 2 T °C	Mezcla 3 T °C	Mezcla 4 T °C	Mezcla 5 T °C	Mezcla 6 T °C	Mezcla 7 T °C	Mezcla 8 T °C
26/12/2007	1	31.10	40.40	29.80	32.00	29.20	31.90	35.15	39.00
27/12/2007	2	46.00	38.80	45.45	31.50	41.20	31.00	42.45	45.00
28/12/2007	3	45.80	41.80	41.80	31.70	41.80	31.50	49.00	50.90
29/12/2007	4	45.95	44.60	46.50	45.50	49.30	44.40	52.10	56.70
30/12/2007	5	45.20	41.20	46.70	50.10	52.30	48.30	55.60	59.00
31/12/2007	6	45.80	45.00	46.80	51.40	50.00	50.20	56.00	57.60
01/01/2008	7	41.20	43.20	49.70	51.20	49.50	50.10	56.20	58.30
02/01/2008	8	38.95	39.85	43.95	48.05	50.60	51.05	69.80	66.40
03/01/2008	9	37.55	41.50	43.25	44.05	51.50	46.15	63.90	64.25
04/01/2008	10	41.55	46.50	48.60	48.80	55.30	49.10	64.00	66.00
05/01/2008	11	40.00	43.80	51.00	54.00	54.90	51.50	66.00	67.90
06/01/2008	12	42.90	44.30	53.00	56.80	57.00	55.00	67.10	68.00
07/01/2008	13	42.70	43.50	55.00	60.00	62.60	54.30	65.00	65.40
08/01/2008	14	40.50	43.70	52.00	58.00	64.00	52.50	62.00	63.00
09/01/2008	15	36.80	38.80	51.00	55.00	61.00	53.00	59.00	61.00
10/01/2008	16	37.00	39.00	51.60	47.70	52.00	53.00	53.00	55.70
11/01/2008	17	36.95	40.40	49.00	45.00	48.00	52.00	48.00	55.00
12/01/2008	18	36.15	38.80	50.00	48.00	49.00	51.00	49.00	53.00
13/01/2008	19	39.25	43.10	54.00	50.00	51.00	52.00	53.00	54.00
14/01/2008	20	33.50	40.80	52.00	45.00	47.00	50.00	53.00	55.00
15/01/2008	21	41.20	43.60	44.50	44.50	41.50	43.50	47.50	47.50
16/01/2008	22	34.40	44.30	44.00	41.00	40.00	42.00	45.00	46.00
17/01/2008	23	40.50	47.10	44.00	45.00	35.00	40.00	43.00	41.00
18/01/2008	24	44.95	44.05	39.00	40.00	37.00	38.00	41.00	45.00
19/01/2008	25	42.90	35.10	39.00	41.00	39.00	40.00	39.00	45.00
20/01/2008	26	47.00	45.10	38.00	40.00	38.00	39.00	40.00	42.00
21/01/2008	27	46.50	45.00	38.20	40.50	38.20	38.90	40.10	41.50
22/01/2008	28	46.00	44.90	38.00	40.10	38.30	38.80	39.30	41.00



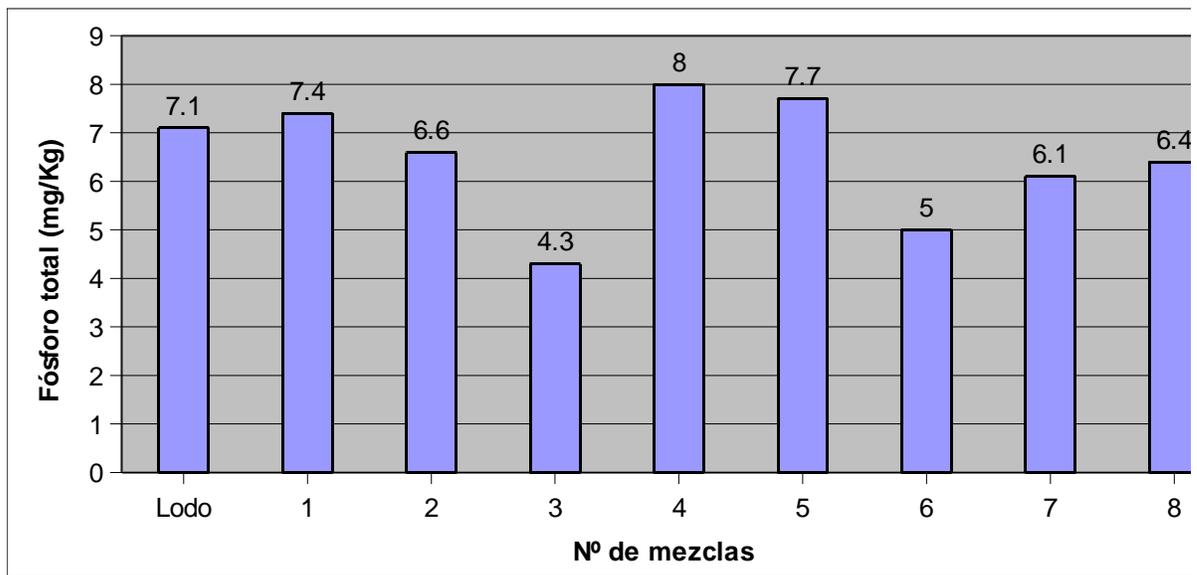
Nº de mezcla	Volumen inicial (m3)	Volumen final (m3)
1	0.60	0.28
2	0.60	0.29
3	0.60	0.41
4	0.60	0.31
5	0.60	0.33
6	0.60	0.42
7	0.60	0.32
8	0.60	0.30



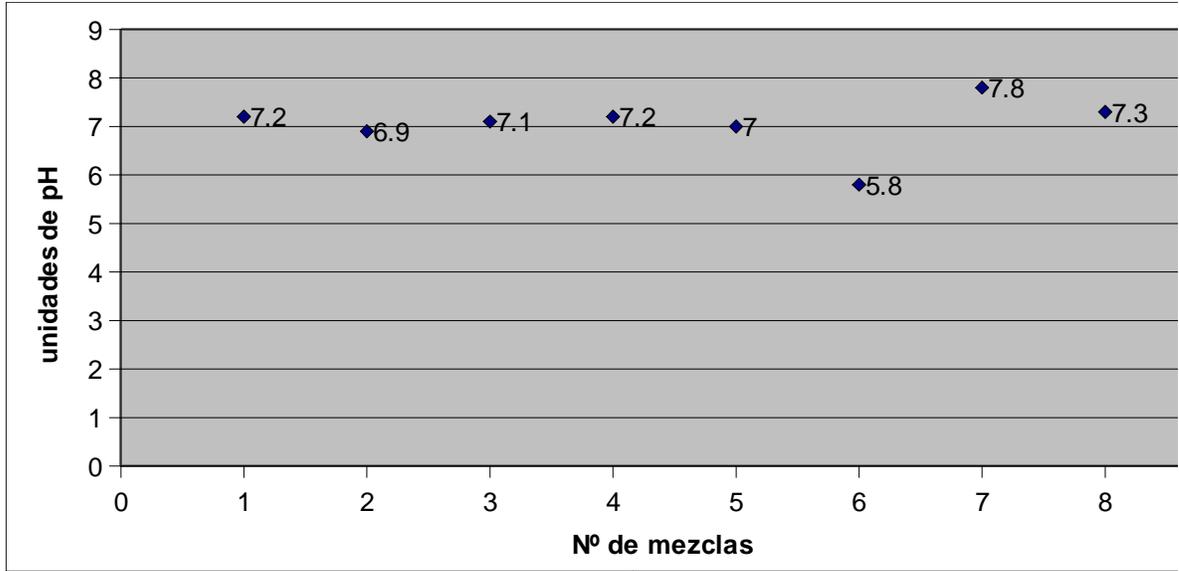
		Lodo	1	2	3	4	5
Humedad	%	77.5	57.7	56	64.8	52.7	64.5



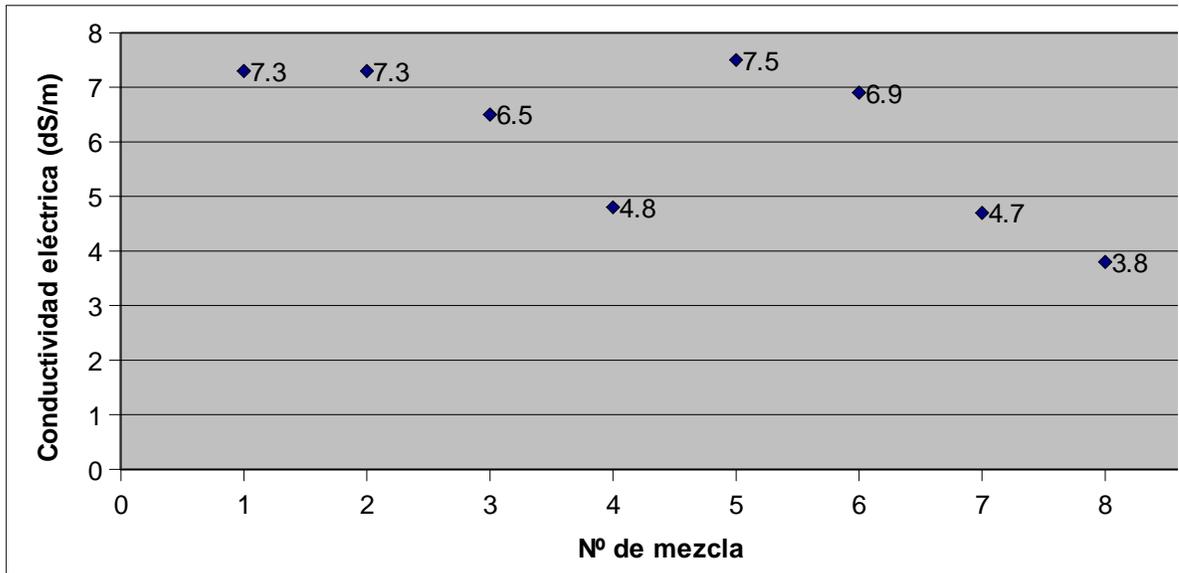
		Lodo	1	2	3	4	5
Fósforo total	mg/Kg	7.1	7.4	6.6	4.3	8	7.7



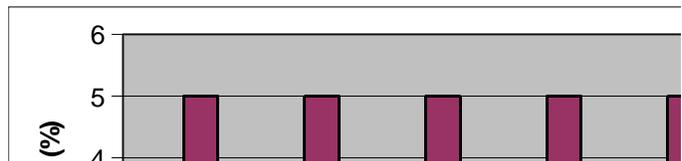
		Lodo	1	2	3	4	5
pH	unidades de pH	7	7.2	6.9	7.1	7.2	7

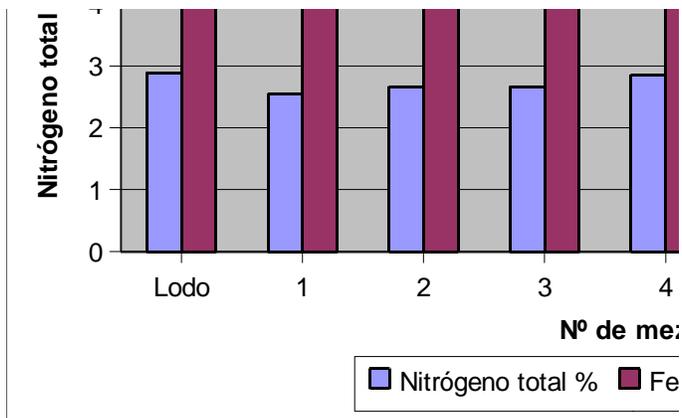


		1	2	3	4	5
C.E.	dS/m	7.3	7.3	6.5	4.8	7.5

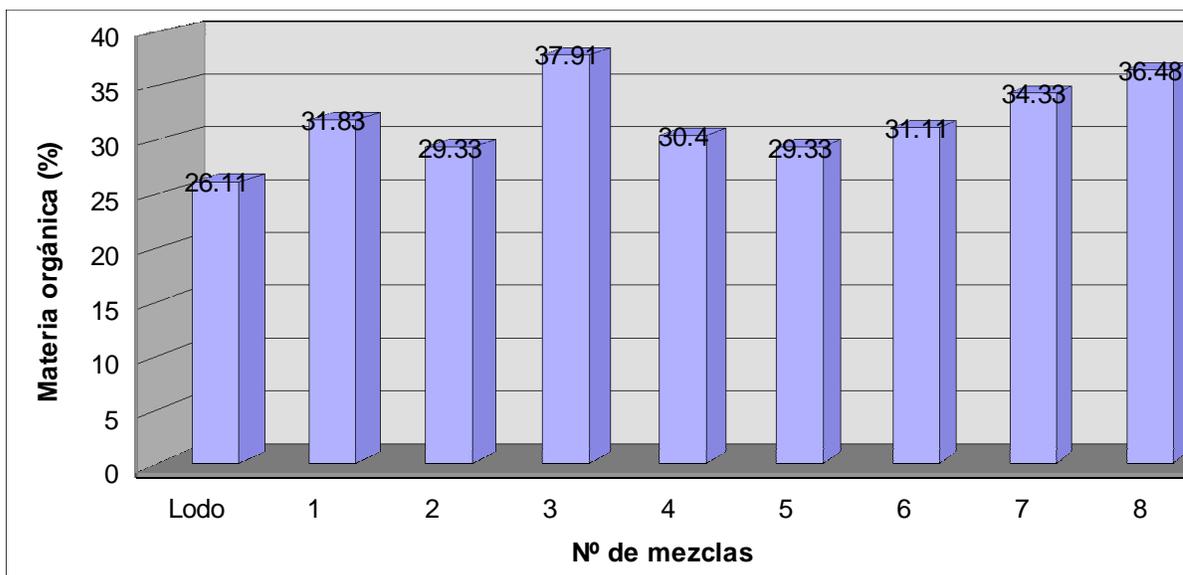


		Lodo	1	2	3	4	5
Nitrógeno total	%	2.89	2.54	2.66	2.66	2.85	2.81
Fertilizante comercial		5	5	5	5	5	5

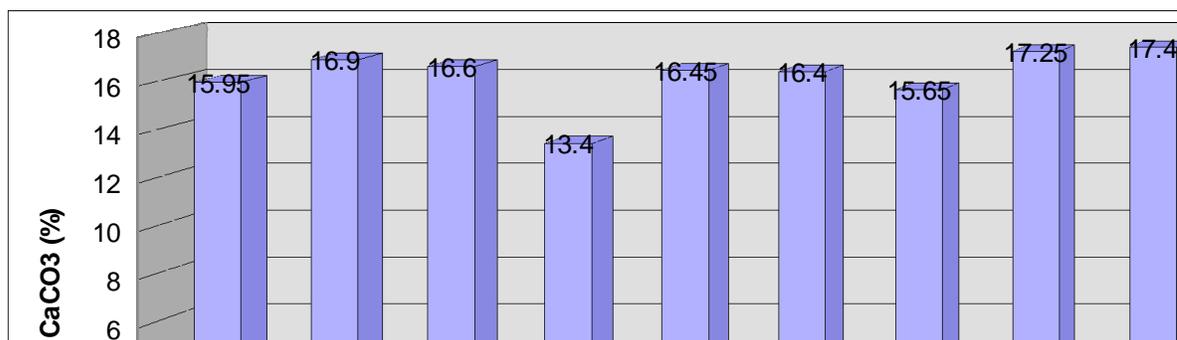


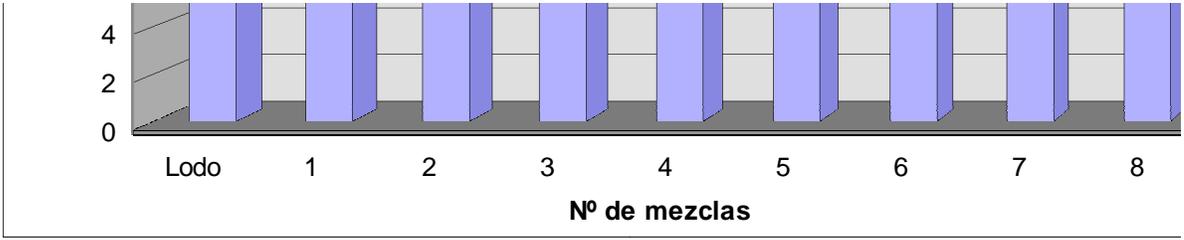


M.O.	%	Lodo	1	2	3	4	5
		26.11	31.83	29.33	37.91	30.4	29.33



CaCO3	%	Lodo	1	2	3	4	5
		15.95	16.9	16.6	13.4	16.45	16.4

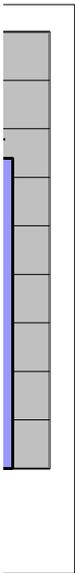




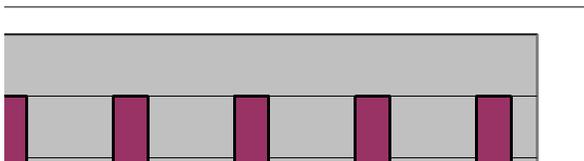
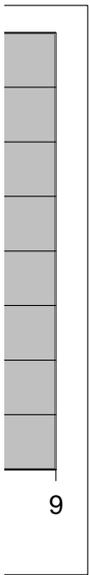
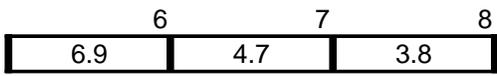
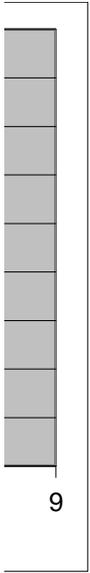
	6	7	8
62.8	55.5	57.4	

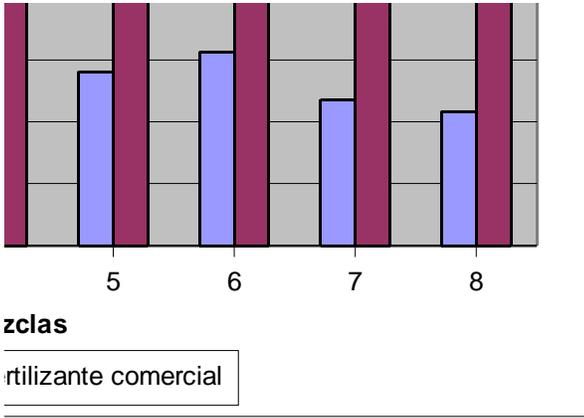


	6	7	8
5	6.1	6.4	

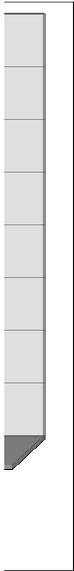


	6	7	8
5.8	7.8	7.3	

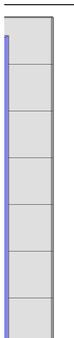


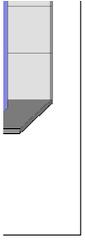


	6	7	8
	31.11	34.33	36.48

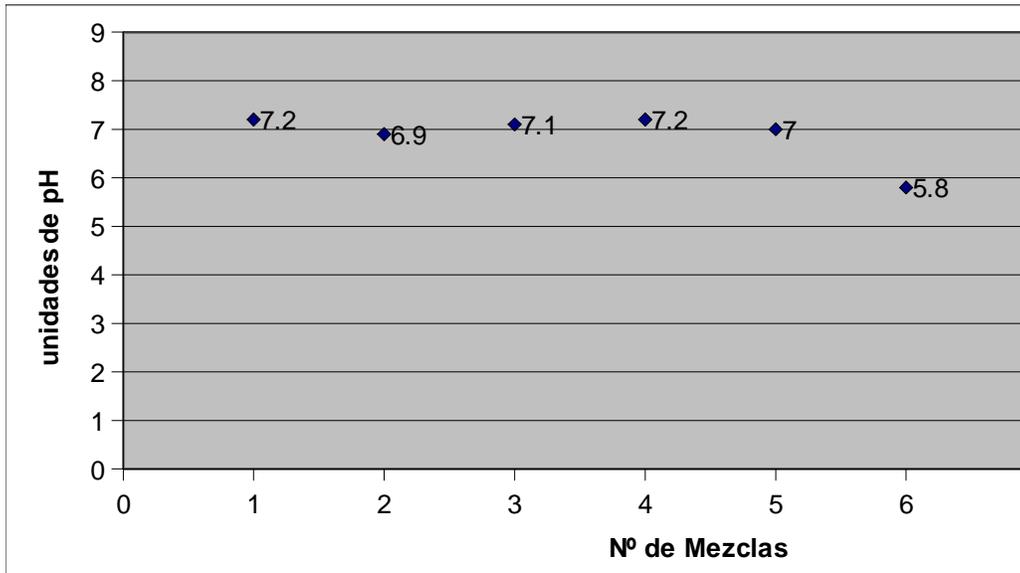


	6	7	8
	15.65	17.25	17.4

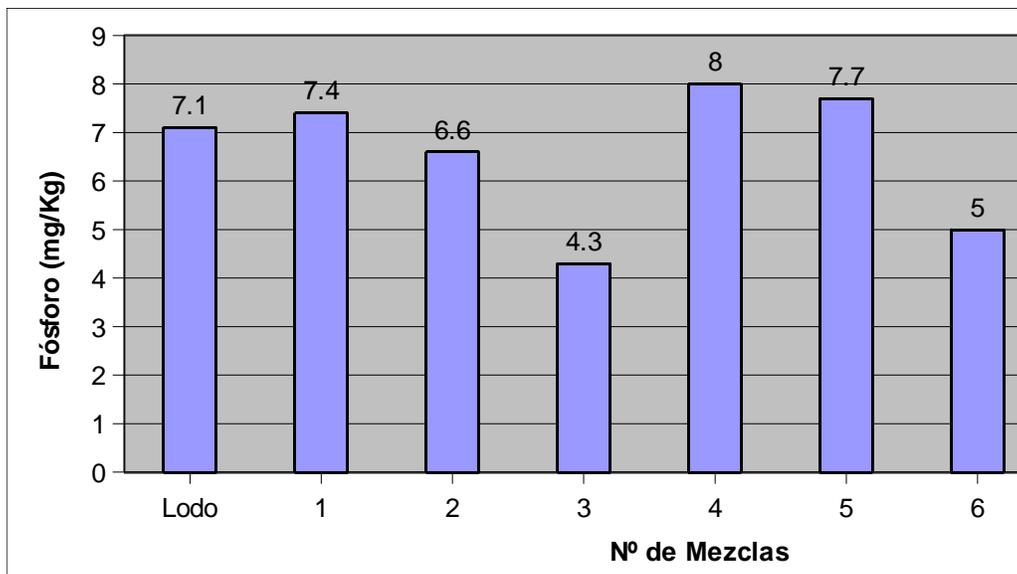




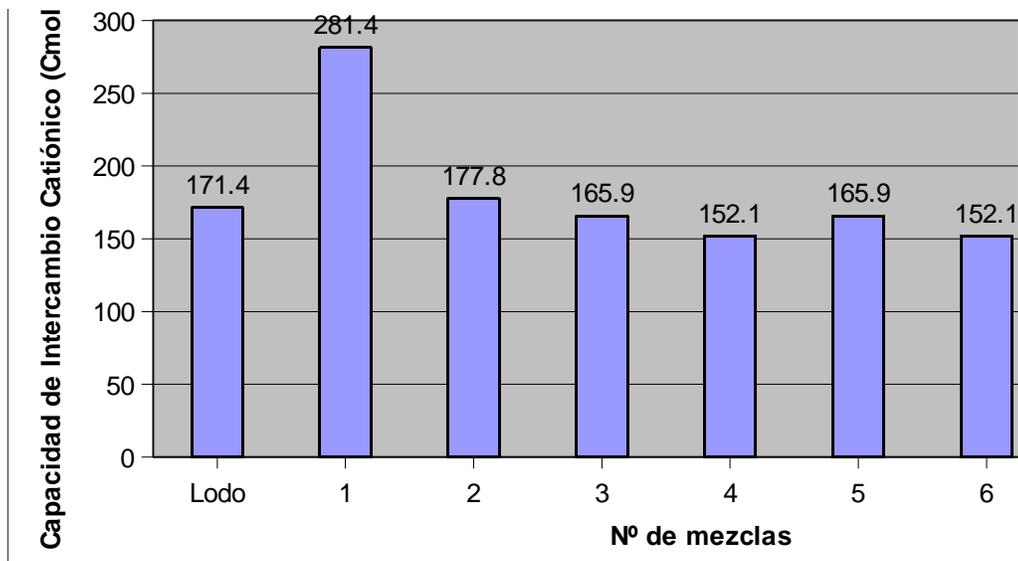
			1	2	3	4
pH	unidades de pH		7.2	6.9	7.1	7.2

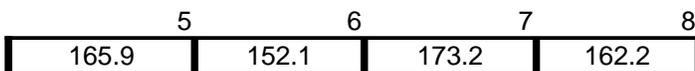
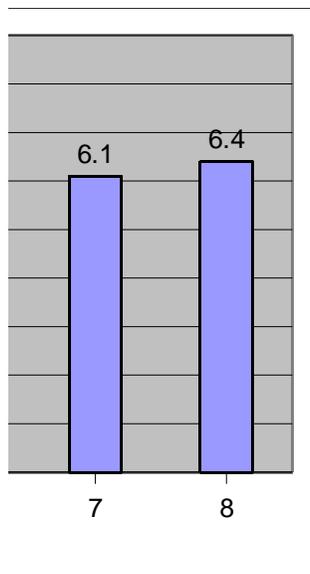
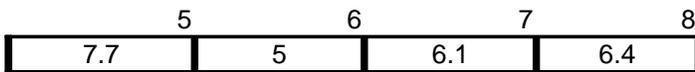
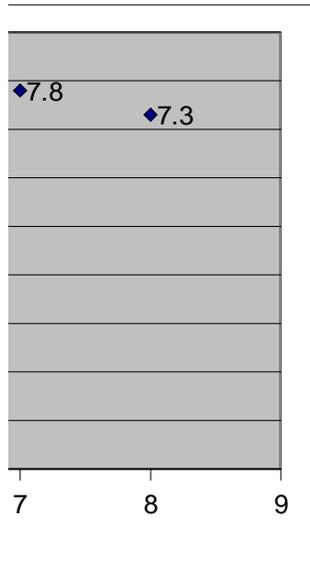
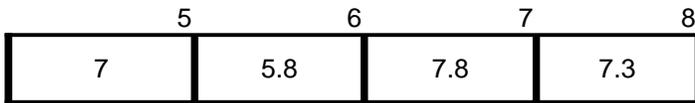


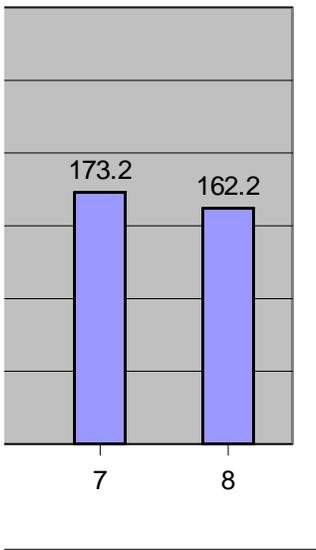
		Lodo	1	2	3	4
Fósforo total	mg/Kg	7.1	7.4	6.6	4.3	8



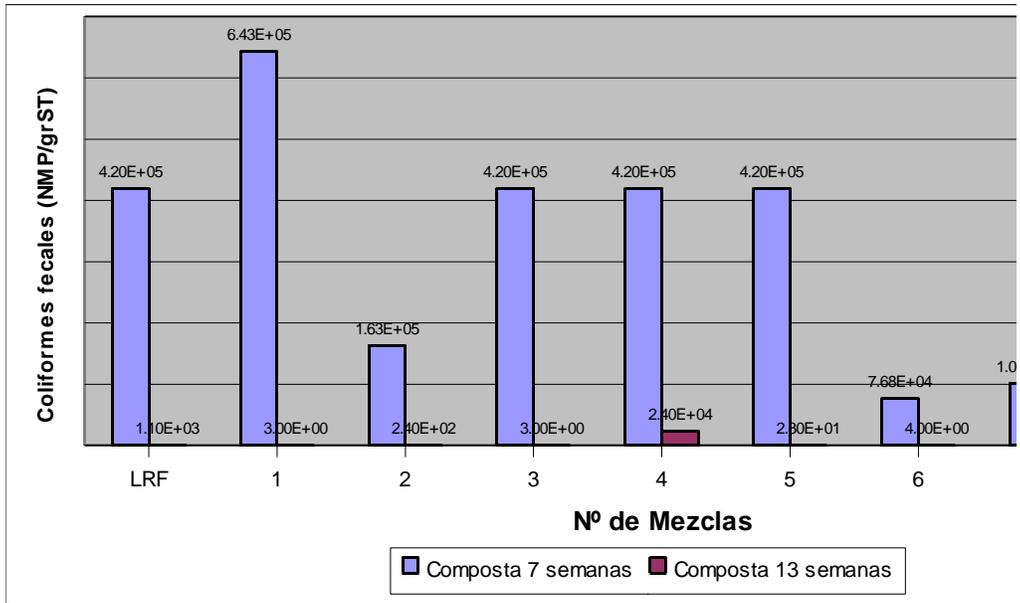
		Lodo	1	2	3	4
C.I.C.	Cmol/kg	171.4	281.4	177.8	165.9	152.1



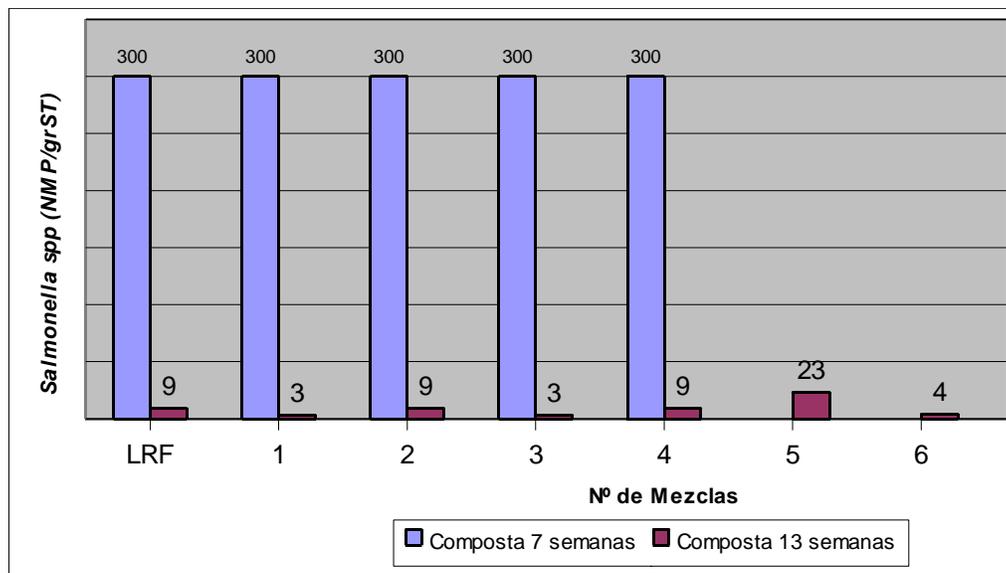




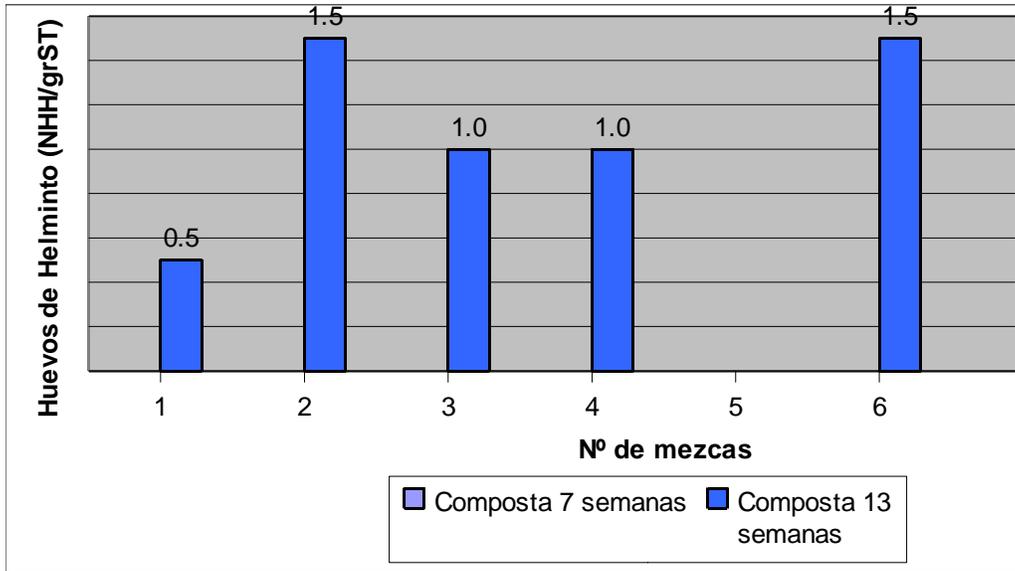
	LRF	1	2	3	4	
Composta	7 semanas	420000	643000	163000	420000	420000
Composta	13 semanas	1100	3	240	3	24,000



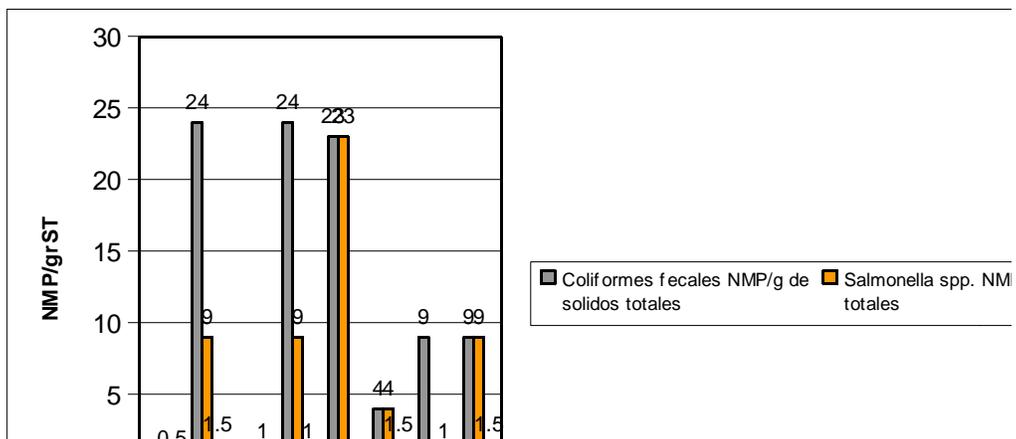
	LRF	1	2	3	4	
Composta	7 semanas	300	300	300	300	300
Composta	13 semanas	9	3	9	3	9

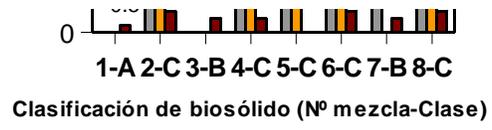


		1	2	3	4	5
Composta	7 semanas	0	0	0	0	0
Composta	13 semanas	0.5	1.5	1.0	1.0	0.0

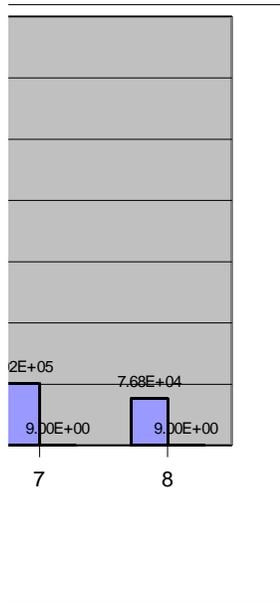


		1-A	2-C	3-B	4-C
Coliformes fecales	NMP/g de solidos totales	< 3	24	< 3	24
<i>Salmonella</i> spp.	NMP/g de solidos totales	< 3	9	< 3	9
Huevos de helmintos	en gr. de solidos totales	0.5	1.5	1	1

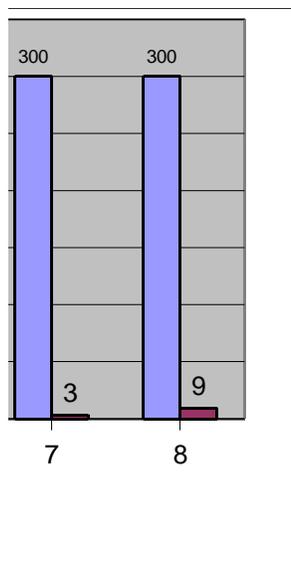




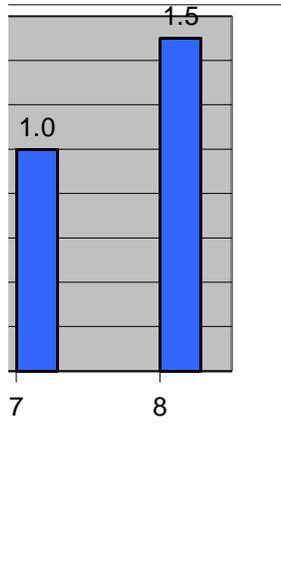
5	6	7	8
420000	76800	102000	76800
23	4	9	9



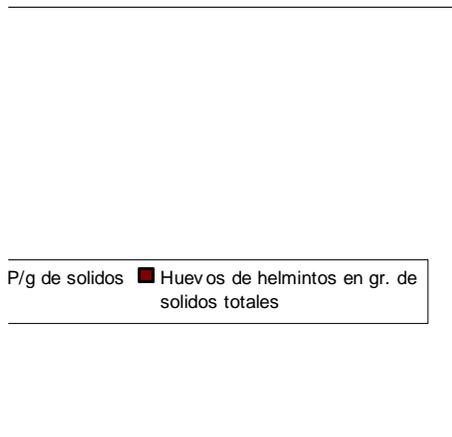
5	6	7	8
0	0	300	300
23	4	3	9



	6	7	8
0	0	0	0
1.5	1.0	1.5	



	5-C	6-C	7-B	8-C
23	4	9	9	
23	4	< 3	9	
0	1.5	1	1.5	





RESULTADOS OBTENIDOS POR LABORATORIO ACREDITADO DE 8 MEZCLAS EXPERIMENTALES EN ESCALA REAL

PARÁMETROS	UNIDAD	A (fresco 100%)	MEZCLAS EXPERIMENTALES EN ESCALA REAL Y PROPORCIÓN							
			N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8
			A+C (1:1)	A+B (1:1)	A+D (1:1)	A+C (2:1)	A+B (2:1)	A+D (2:1)	A+B+C (1:1:1)	A+B+C (1:2:1)
pH	unidades de pH		7.2	6.9	7.1	7.2	7	5.8	7.8	7.3
Humedad	%	77.5	57.7	56	64.8	52.7	64.5	62.8	55.5	57.4
Conductividad eléctrica	µS/cm		10000	10000	10000	10000	10000	10000	6200	7000
Salinidad efectiva	meq/L	19.52	66.99	140.63	47.46	119.45	49.63	58.65	114.35	111.91
Carbono Orgánico Total	%	2.98	3.71	3.65	3.45	3.45	3.62	3.65	3.42	3.63
Sólidos Totales	%	23	41.3	43.1	35.3	45.3	36.4	37.5	42	41
Sólidos Volátiles	%	13.9	19.7	21.3	20.8	20.5	17.2	20.3	20.4	20.3
Nitratos (como N-Inorg)	mg/Kg		300	210	300	230	168.5	282.5	50	84.5
Nitrógeno Total	mg/Kg	12.1	11.2	11.9	7.8	12.9	10.9	8.8	10.1	11.4
Fósforo total	mg/Kg	7.1	7.4	6.6	4.3	8	7.7	5	6.1	6.4
Fierro	mg/Kg		4838.9	4308.7	3360.5	4855.6	5259.3	3723.3	3801	3961
Manganeso	mg/Kg		122.5	99.3	9690.7	10990.6	121.9	93.4	100.4	134.4
Zinc	mg/Kg	817.67	952.5	745.2	709.6	947.6	1033.8	745.1	686.7	700.7
Cobre	mg/Kg	231.06	252.4	217	204.2	300.9	277.6	216.9	153.4	138.5
Calcio	meq/100g	364	463.75	444.95	352.96	517.1	506.49	382.96	424.22	359.59
Magnesio	meq/100g		101.39	107.72	80.75	91.59	90.94	68.56	172.3	77.89
Sodio	meq/100g		3.5	5.9	2.6	2.8	2.5	2.9	5.2	4.7
Potasio	meq/100g	0.9	3.5	8.1	2.2	3.2	2.4	3	6.2	6.5
Cloruros	meq/L		6.9	19	6.2	17.9	6.9	16.6	15.9	15.2
Carbonatos	meq/L		0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfatos (Como SO4=)	meq/L		43.3	39.6	42.6	44.5	32.8	35.3	26.9	29.1
Coliformes Fecales	NMP/g de solidos totales	1100	< 3	240	< 3	24000	23	4	9	9
Salmonella	NMP/g de solidos totales	9	< 3	9	< 3	9	23	4	< 3	9
Huevos de Helminto	en 2 g de solidos totales	0	1	3	2	2	0	3	2	3

A= LODO    B=BAGAZO    C=PODA    D=ASERRIN