



**UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA**

**UNIDAD IZTAPALAPA**

**DIVISION DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
Y DE LA SALUD**

**/// BALANCES DE CALOR EN UN PROCESO  
DE BIODEGRADACION DE LODOS  
ACTIVADOS POR FERMENTACION SOLIDA \\**

**U. A. M. IZTAPALAPA BIBLIOTECA**

Tesis presentada por:

**JULIA MARIA ~~MENDOZA WEISSKOPF~~**

para obtener el grado de

**MAESTRA EN BIOTECNOLOGIA**

Presentada el 14 de diciembre de 1994 ante el  
jurado compuesto por:

M. en C. Mariano Gutiérrez Rojas

Presidente

Dr. Ernesto Favela Torres

Secretario

Dr. Rafael Chávez Rivera

Vocal

M. en C. Esperanza Ramírez Camperos

Vocal

México, D. F.

**DEDICATORIA**

153897

**A RICARDO CON TODO MI AMOR**

**A MIS PADRES POR APOYARME SIN IMPORTAR LA DISTANCIA**

**A MIS HERMANOS POR SU COMPRENSION**

**A MI PAIS**

2-XII-95

*Buenos*

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en la Planta Piloto de Fermentación Sólida de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, bajo la dirección del Dr. Ernesto Favela Torres y el M. en C. Mariano Gutiérrez Rojas, con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

De manera especial quiero agradecer a la Secretaría de Relaciones Exteriores de México por haberme otorgado una beca por dos años, para la realización de la Maestría en Biotecnología.

A Mariano por haberme guiado y apoyado en mi aprendizaje.

A Ernesto por su comprensión, dirección y optimismo, que facilitó el trabajo. Gracias por leer y corregir este documento.

A la M en C. Esperanza Ramírez y al Dr. Rafael Chávez por los comentarios realizados al trabajo.

A la Biol. Patricia Araiza por el diseño de la caja aislante y el reactor prototipo.

A la Biol. María Guadalupe Barajas, al M. en C. Rafael Campos y al M. en C. Jorge Quintana por los análisis microbiológicos presentados en este trabajo.

Al Lic. Ricardo Janeiro Merino, del Ingenio Casasano por facilitarnos el bagacillo de caña.

Al Ing. Juan Ilario García Gil, de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria por proporcionarnos los lodos activados.

A los Drs. Sergio Huerta y Gerardo Saucedo por sus consejos y ayuda incondicional.

A mis compañeros de la Planta Piloto por toda su ayuda.

Y a todas aquellas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

# CONTENIDO

<b>Contenido</b>	i
<b>Indice de Figuras</b>	v
<b>Indice de Tablas</b>	vii
<b>Indice de Fotografías</b>	viii
<b>Resumen</b>	ix

## PARTE I. ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS.

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Revisión Bibliográfica</b>	3
2.1. Proceso de composteo	3
2.1.1. Variables fisicoquímicas del proceso de composteo	4
A. Temperatura	4
B. pH	4
C. Relación carbono/nitrógeno	5
D. Humedad	5
E. Aireación	5
F. Actividad de agua (Aw)	6
2.1.2. Generación de calor metabólico	6
2.1.3. Variables biológicas	6
A. Microorganismos en el material a compostear	6
B. Macroflora y macrofauna en el proceso de composteo	8
2.2. Sistemas de composteo a nivel laboratorio	9

## PARTE II. MATERIALES Y METODOS.

<b>3. Metodología experimental</b>	13
3.1. Sistema modelo experimental	13
3.1.1. Material modelo	13
3.1.2. Reactores	14

A. Reactor prototipo	14
B. Columnas de fermentación	14
3.1.3. Condiciones de operación	16
A. Densidad de empaque	16
B. Aireación	16
C. Condiciones iniciales del material	16
D. Aislamiento del sistema modelo	16
E. Control diferencial de temperatura	17
<b>4. Análisis experimental</b>	<b>21</b>
4.1. Análisis físico-químicos	21
4.1.1. Determinación de nitrógeno	21
4.1.2. Determinación de carbono	21
4.1.3. Determinación del contenido de humedad	21
4.1.4. Determinación del pH	21
4.1.5. Determinación de la actividad de agua	21
4.1.6. Determinación de azúcares solubles	21
4.1.7. Medición de temperatura	22
4.1.8. Determinación de amoníaco	22
4.2. Análisis microbiológicos	22
4.2.1. Preparación de la muestra	22
4.2.2. Aislamiento, medios de cultivo y cuantificación de microorganismos	22
4.3. Análisis de la densidad poblacional de macrofauna y macroflora.	23
<b>5. Bases teóricas. Definición de las ecuaciones para los balances de calor</b>	<b>25</b>
 <b>PARTE III. RESULTADOS Y DISCUSION</b>	
<b>6. Selección del material</b>	<b>28</b>
6.1. Determinación de la relación bagacillo/lodos a utilizar	28
6.2. Conclusiones	31
<b>7. Procesos de composteo</b>	<b>32</b>
7.1. Medio de temperatura controlada agua: isotérmico.	32
7.1.1. Condiciones del experimento	32

7.1.2. Cinética de temperatura	32
7.1.3. Cinética de la pérdida del material a compostear	34
7.1.4. Consumo de azúcares solubles	36
7.1.5. Cinética de carbono	37
7.1.6. Cinética de nitrógeno	37
7.1.7. Cinética de la relación carbono/nitrógeno	38
7.1.8. Cinética de humedad	39
7.1.9. Cinética de actividad de agua	39
7.1.10. Cinética de pH	40
7.2. Medio de temperatura controlada agua: no isotérmico.	41
7.2.1. Condiciones del experimento	41
7.2.2. Cinética de temperatura	41
7.2.3. Cinética de la pérdida del material a compostear	44
7.2.4. Consumo de azúcares solubles	44
7.2.5. Cinética de carbono	45
7.2.6. Cinética de nitrógeno	46
7.2.7. Producción de amoníaco	47
7.2.8. Cinética de la relación carbono/nitrógeno	48
7.2.9. Cinética de humedad	49
7.2.10. Cinética de pH	49
7.3. Medio de temperatura controlada aire: no isotérmico.	50
7.3.1. Condiciones del experimento	50
7.3.2. Cinética de temperatura	51
7.3.3. Cinética de la pérdida del material a compostear	52
7.3.4. Consumo de azúcares solubles	54
7.3.5. Cinética de carbono	54
7.3.6. Cinética de nitrógeno	55
7.3.7. Producción de amoníaco	56
7.3.8. Cinética de la relación carbono/nitrógeno	56
7.3.9. Cinética de humedad	56
7.3.10. Cinética de actividad de agua	57
7.3.11. Cinética de pH	58
7.4. Discusión general	59
7.4.1. Cinética de temperatura	59
7.4.2. Cinética de la pérdida del material a compostear	59
7.4.3. Consumo de azúcares solubles	59

7.4.4. Cinética de carbono	59
7.4.5. Cinética de nitrógeno	60
7.4.6. Cinética de la relación carbono/nitrógeno	60
7.4.7. Cinética de humedad	60
7.4.8. Cinética de pH	60
7.5. Conclusiones	60
<b>8. Balances de calor</b>	62
8.1. Calor metabólico producido	62
8.1.1. Experimento AGI	62
8.1.2. Experimento AGNI	65
8.1.3. Experimento AINI	67
8.2. Discusión general	69
8.3. Conclusiones	70
<b>9. Poblaciones de microorganismos, macrofauna y macroflora</b>	72
9.1. Poblaciones de microorganismos aisladas de los lodos activados	72
9.2. Cinética de microorganismos	72
9.3. Cinética poblacional de macrofauna y macroflora	74
9.4. Discusión General	75
9.5. Conclusiones	76
<b>10. Conclusiones generales</b>	77
<b>11. Referencias</b>	79
<b>Anexo 1. Nomenclatura</b>	84

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Pretratamiento de la mezcla a compostear	14
<b>Figura 3.2.</b> (a) Vista frontal del reactor de acrílico; (b) vista superior de la base del reactor	15
<b>Figura 3.3.</b> (a) Columnas de fermentación tipo Raimbault; (b) burbujeadores	15
<b>Figura 3.4.</b> Vista superior de la cámara aislante y la disposición de los diferentes componentes.	17
<b>Figura 3.5.</b> Diagrama de control diferencial de temperatura	18
<b>Figura 4.1.</b> Método de Uhlig modificado, utilizado para separar la macrofauna y macroflora del material a compostear	23
<b>Figura 6.1.</b> Pérdida del material a compostear para las diferentes proporciones bagacillo/lodos	30
<b>Figura 7.1.</b> Cinética de temperatura del experimento AGI	33
<b>Figura 7.2.</b> Gradientes de temperatura radial y axial por unidad de distancia. Experimento AGI	34
<b>Figura 7.3.</b> Cinética de la pérdida del material a compostear. Experimento AGI	35
<b>Figura 7.4.</b> Constante de la velocidad de reacción del experimento AGI	36
<b>Figura 7.5.</b> Cinética de azúcares solubles. Experimento AGI	36
<b>Figura 7.6.</b> Cinética de carbono del experimento AGI	37
<b>Figura 7.7.</b> Cinética de nitrógeno, experimento AGI	38
<b>Figura 7.8.</b> Cinética de la relación carbono/nitrógeno. Experimento AGI	38
<b>Figura 7.9.</b> Cinética de humedad del experimento AGI	39
<b>Figura 7.10.</b> Cinética de actividad de agua. Experimento AGI	40
<b>Figura 7.11.</b> Cinética de pH. Experimento AGI	41
<b>Figura 7.12.</b> Cinética de temperatura del experimento AGNI	42
<b>Figura 7.13.</b> Gradientes de temperatura radial y axial por unidad de distancia. Experimento AGNI.	43
<b>Figura 7.14.</b> Cinética de la pérdida del material a compostear. Experimento AGNI	44
<b>Figura 7.15.</b> Constante de la velocidad de reacción del experimento AGNI	45
<b>Figura 7.16.</b> Cinética de azúcares solubles. Experimento AGNI	46
<b>Figura 7.17.</b> Cinética de carbono del experimento AGNI	47
<b>Figura 7.18.</b> Cinética de nitrógeno, experimento AGNI	47
<b>Figura 7.19.</b> Cinética de pérdida de nitrógeno en la fase gaseosa, corrida AGNI	47

<b>Figura 7.20.</b> Cinética de la relación carbono/nitrógeno. Experimento <b>AGNI</b>	48
<b>Figura 7.21.</b> Cinética de humedad del experimento <b>AGNI</b>	49
<b>Figura 7.22.</b> Cinética de pH. Experimento <b>AGNI</b>	50
<b>Figura 7.23.</b> Cinética de temperatura del experimento <b>AINI</b>	51
<b>Figura 7.24.</b> Gradiente de temperatura radial. Experimento <b>AINI</b>	52
<b>Figura 7.25.</b> Cinética de la pérdida del material a compostear. Experimento <b>AINI</b>	53
<b>Figura 7.26.</b> Constante de la velocidad de reacción del experimento <b>AINI</b>	53
<b>Figura 7.27.</b> Cinética de azúcares solubles. Experimento <b>AINI</b>	54
<b>Figura 7.28.</b> Cinética de carbono del experimento <b>AINI</b>	55
<b>Figura 7.29.</b> Cinética de nitrógeno, experimento <b>AINI</b>	55
<b>Figura 7.30.</b> Cinética de pérdida de nitrógeno en la fase gaseosa, experimento <b>AINI</b>	56
<b>Figura 7.31.</b> Cinética de la relación carbono/nitrógeno. Experimento <b>AINI</b>	57
<b>Figura 7.32.</b> Cinética de humedad. Experimento <b>AINI</b>	57
<b>Figura 7.33.</b> Cinética de actividad de agua. Experimento <b>AINI</b>	58
<b>Figura 7.34.</b> Cinética de pH. Experimento <b>AINI</b>	58
<b>Figura 8.1.</b> Transferencia de calor. Experimento <b>AGI</b>	64
<b>Figura 8.2.</b> Transferencia de calor. Experimento <b>AGI</b>	64
<b>Figura 8.3.</b> Calor metabólico total producido durante el proceso <b>AGI</b>	65
<b>Figura 8.4.</b> Transferencia de calor. Experimento <b>AGNI</b>	66
<b>Figura 8.5.</b> Transferencia de calor. Experimento <b>AGNI</b>	66
<b>Figura 8.6.</b> Calor metabólico total producido durante el proceso <b>AGNI</b>	67
<b>Figura 8.7.</b> Transferencia de calor. Experimento <b>AINI</b>	67
<b>Figura 8.8.</b> Transferencia de calor. Experimento <b>AINI</b>	68
<b>Figura 8.9.</b> Calor metabólico total producido durante el proceso <b>AINI</b>	68
<b>Figura 9.1.</b> Cinética de microorganismos aislados del material a compostear. Experimento <b>AINI</b>	73
<b>Figura 9.2.</b> Cinética de protozoarios y algas	74
<b>Figura 9.3.</b> Cinética de asquelmintos y formas resistentes de vida	75

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Organismos involucrados en el composteo	7
<b>Tabla 2.2.</b> Población microbiana durante el composteo	8
<b>Tabla 3.1.</b> Solución de elementos traza utilizados en la mezcla a compostear	13
<b>Tabla 4.1.</b> Temperaturas de incubación, medios de cultivo y tiempo de conteo para las diferentes poblaciones	23
<b>Tabla 6.1.</b> Determinaciones fisico-químicas de los lodos activados y bagacillo de caña	28
<b>Tabla 6.2.</b> Composición en peso de las diferentes mezclas a compostear	29
<b>Tabla 6.3.</b> Condiciones de las distintas mezclas bagacillo/lodos después del prensado	29
<b>Tabla 6.4.</b> Resultados de las pruebas fisico-químicas de las diferentes proporciones bagacillo/lodos	29
<b>Tabla 7.1.</b> Condiciones iniciales del material a compostear. Experimento AGI	32
<b>Tabla 7.2.</b> Condiciones iniciales del material a compostear. Experimento AGNI	42
<b>Tabla 7.3.</b> Distribución del tamaño de partícula del bagacillo de caña	50
<b>Tabla 7.4.</b> Condiciones iniciales del material a compostear. Experimento AINI	51
<b>Tabla 8.1.</b> Constantes para el cálculo del calor metabólico	63
<b>Tabla 8.2.</b> Contribución de los diferentes mecanismos de transferencia de calor	69
<b>Tabla 9.1.</b> Microorganismos nativos en los lodos activados	72

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

<b>Fotografía 3.1.</b> Sistema modelo utilizando como medio de temperatura controlada agua	19
<b>Fotografía 3.2.</b> Sistema modelo utilizando aire como medio de temperatura controlada	20
<b>Fotografía 3.3.</b> Acercamiento de las columnas de fermentación y el reactor prototipo	21
<b>Fotografía 3.4.</b> Sistema de acondicionamiento del aire de recirculación de la cámara	22

## RESUMEN

El composteo es un proceso que se utiliza desde hace mucho tiempo para la disminución del volumen y estabilización de residuos sólidos orgánicos. La heterogeneidad en la composición de los materiales a compostear ha dificultado el estudio y la caracterización, en particular del control de las condiciones de operación. Durante las primeras etapas de composteo, la temperatura, debida al calor endógeno, es la presión selectiva que determina las poblaciones microbianas que predominan durante todo el proceso.

En este trabajo se diseña un sistema experimental modelo con el que se estudia la etapa inicial del composteo. El sistema experimental modelo, constituido por un material de composición conocida empacado en reactores cilíndricos de aireación forzada y temperatura ambiente controlada, permitió estudiar los cambios de las variables propias del sistema.

Los principales constituyentes del material de estudio fueron: (i) bagacillo de caña de azúcar, utilizado como agente de volumen para proporcionar espacios vacíos favoreciendo el intercambio gaseoso y como agente absorbente de agua; (ii) medio de cultivo rico en sales y azúcares de fácil asimilación, para favorecer el crecimiento microbiano inicial y (iii) lodos activados como fuente de las diferentes poblaciones de microorganismos aerobios.

Por la importancia del calor metabólico producido durante la etapa inicial, el sistema se caracteriza a través de los balances de calor entre el sistema y el medio que lo rodea.

Se estudia el efecto del control de la temperatura diferencial del medio sobre las variables propias del proceso. Durante las primeras 150 horas de proceso la temperatura del medio aislante aumenta desde 35°C hasta 60°C, manteniéndose hasta por 100 horas. Como consecuencia de estas elevaciones de temperatura se observa una elevada evolución de amoníaco.

En las tres primeras fases del proceso de biodegradación se obtuvo un pérdida aproximada de material a compostear del 30% y un consumo de carbono también del 30%, por lo que la mayor pérdida de material en el proceso es de la fuente de carbono que

se transformó en dióxido de carbono; la mayor velocidad de disminución del material a compostear se observó en las primeras horas de la etapa termofílica, que correspondió al consumo de los azúcares solubles.

Se realizaron balances de energía y se obtuvo que en los experimentos en que se utilizó un control de temperatura, se acumuló en mayor cantidad el calor metabólico, ya que la vía convectiva y latente de vaporización no fueron suficientes para remover todo el calor metabólico producido. En el experimento que no se usó el control diferencial de temperatura no se observó acumulación de calor, ya que el mecanismo por el que se perdió el calor metabólico fue el conductivo.

El sistema propuesto reproduce el proceso de composteo con la ventaja que se puede estudiar mejor la interacción de las variables que intervienen llevando así un mejor control sobre el proceso. También se presenta una alternativa para el procesamiento de los lodos activados que se obtienen del procesamiento de las aguas residuales.

***PARTE I.***

***ANTECEDENTES  
BIBLIOGRAFICOS***

## 1. INTRODUCCION

El composteo se define como la descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico, bajo condiciones que permiten la evolución de la temperatura como resultado del calor metabólico producido, requiriendo para ello condiciones especiales de humedad y aireación (Haug, 1993).

Por miles de años, el composteo se ha utilizado como un proceso de tratamiento de desechos sólidos. En los últimos años se ha hecho énfasis en el tratamiento de desechos sólidos municipales y lodos activados, ya que ellos constituyen un problema en la vida doméstica normal (Stentford y Dodds, 1992); en este contexto, la principal finalidad es estabilizar y secar los desechos para obtener una disposición final aceptable para el medio ambiente (Hogan y col., 1989).

El composteo se ha llevado a cabo en una forma empírica sin lograr entender con precisión cómo y por qué suceden los cambios. Los beneficios que aporta el proceso para el tratamiento de residuos ha hecho que se estudie con más detenimiento, tratando de entender como se van sucediendo las reacciones bioquímicas, la interacción entre las variables y las condiciones que favorecen el proceso. En tanto que el proceso de composteo a escala industrial es difícil de controlar y, de alguna forma, no permite evaluar todos los parámetros que influyen, se hace necesario contar con un sistema a escala laboratorio en el que se puedan medir las variables del proceso y describir los cambios que se llevan a cabo así como la interacción entre ellos.

Se han realizado algunos estudios del proceso de composteo a escala laboratorio desde inicios de la década de los 80, en los que se correlacionan los efectos de tales variables como temperatura, humedad, pH, aireación, tamaño de partícula, fuente de inóculo, agente de volumen, entre otros, sobre el desarrollo de los microorganismos encargados de la degradación del medio (Nakasaki y col., 1985a, 1985b, 1985c, 1985d, 1986, 1987, 1988, 1990, 1992; Bach y col., 1984 y 1985; Hogan y col., 1989). También se han presentado trabajos a escala laboratorio, en los que utilizan ecuaciones básicas de transferencia de calor total para el sistema, utilizando los resultados para crear estrategias que permitan usar eficientemente el calor metabólico producido durante el composteo (Bach y col., 1987).

El objetivo general del presente trabajo fue el de diseñar un sistema modelo para llevar a cabo a nivel laboratorio el proceso de composteo, con el fin de estudiar la interacción de las variables relevantes del proceso, a través de balances de calor. Por lo que fue necesario hacer un

determinación previa de los materiales que se utilizarían, montando una metodología de tratamiento de la mezcla utilizada.

La realización del trabajo se fundamentó en que el comportamiento típico del proceso de composteo se reproduciría a escala laboratorio utilizando un sistema modelo. También se sustentó en que los lodos activados provenientes del tratamiento de aguas residuales fueron fuente de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica y convertirla en un material estable.

Este trabajo se dividió en tres partes, en la primera se presenta una descripción del proceso de composteo y las variables físico-químicas y biológicas que intervienen. Luego se hace una revisión de los trabajos realizados sobre el composteo a nivel laboratorio.

En la segunda parte se presenta el sistema modelo utilizado constituido por: un material de composición conocida, un reactor prototipo, un sistema aislante y un sistema de control diferencial de temperatura. También se presentan las técnicas analíticas utilizadas para la medición de las variables físico-químicas y para los análisis microbiológicos. Se propone un modelo para determinar la cantidad de calor metabólico.

En la tercera parte del trabajo se muestran los resultados de las cinéticas de temperaturas, azúcares solubles, carbono, nitrógeno, relación carbono nitrógeno, pH, humedad, actividad de agua y evolución de amoníaco obtenidas de tres experimentos realizados con el sistema modelo. Con los resultados de las cinéticas de temperatura se calculó el calor metabólico total producido, y para cada una de las etapas de los experimentos se determinó los diferentes mecanismos de transferencia de calor involucrados: conductivo, convectivo, de evaporación. Finalmente se presenta el desarrollo de las diferentes poblaciones de microorganismos que se sucedieron en el transcurso de los experimentos.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA.

Este capítulo se dividirá en dos partes, en la primera se presentan las características que definen al proceso de composteo; y en la segunda se reseñan los trabajos más importantes de composteo realizados a nivel laboratorio.

### 2.1. PROCESO DE COMPOSTEO.

El composteo es un proceso de fermentación en medio sólido (FMS) que se caracteriza por tener un sustrato húmedo, sólido e insoluble que es fermentado por microorganismos en ausencia de agua libre, (Lonsane y col., 1985, Cannel y Moo-Young, 1980).

Existen muchas definiciones de lo que es el composteo, y todas ellas tienen el mismo fondo: una descomposición biológica con el fin de estabilizar un sustrato orgánico, produciendo con ello altas temperaturas producto del calor metabólico generado, en presencia de oxígeno.

Finstein y col. (1986), representan el composteo con una ecuación básica:



El material orgánico heterogéneo normalmente contiene una mezcla de poblaciones nativas de microorganismos. Cuando la humedad del material se encuentra en el rango adecuado y el material es aireado, los microorganismos empiezan a desarrollarse y degradar el material, generando con ello calor. Los materiales a compostear contienen principalmente una mezcla de azúcares, proteínas, grasas, hemicelulosa, celulosa y lignina. Durante el composteo (Crawford, 1983) la hemicelulosa y las proteínas son degradadas al inicio de la etapa termofílica; y la celulosa es degradada por los hongos termofílicos en el momento en que la temperatura del material se encuentra en el valor máximo y durante, mientras que la lignina es degradada hasta la etapa de maduración, aún cuando se ha publicado que durante todo el proceso sufre algunas modificaciones en su estructura (Gray y Biddlestone, 1974).

Entre las ventajas que presenta el sistema de composteo (Haug, 1993; Crawford, 1983; Finstein y col., 1986; Minnich y Hunt, 1979; Gray y Biddlestone, 1974) destaca que:

- Reduce el volumen de los desechos a un producto estable.
- Permite que los desechos orgánicos sean reciclados sin destrucción de su valor energético.
- El producto final del composteo es un material similar al humus, que puede utilizarse como acondicionador de suelos, evitando las pérdidas por lixiviación de macronutrientes en el suelo.
- Es una medida sanitaria que destruye los microorganismos patógenos, larvas y huevos de araña, pues mueren debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso.

- La composta contiene nutrientes valiosos para el suelo, incluyendo nitrógeno, fósforo y potasio, así como una variedad de micronutrientes esenciales (cobre, hierro, zinc, etc.).
- Los nutrientes forman compuestos orgánicos, liberándolos lentamente, conforme la planta los necesita, haciendo a los nutrientes menos susceptibles a perderse por lixiviado.

Potencialmente, todos los desechos orgánicos sólidos y semisólidos pueden utilizarse como materiales para estabilizarlos por medio del composteo. En las últimas décadas se ha generado un nuevo desecho, los lodos producidos de las plantas de tratamientos de agua residuales, por ejemplo la planta de tratamiento de aguas de residuales de Ciudad Universitaria está diseñada para tratar 40 l/s de aguas residuales provenientes de Ciudad Universitaria y de una colonia aledaña, produciéndose alrededor de 1,725 m<sup>3</sup> de lodos activados diariamente (Durán y col., 1992). El problema principal es el volumen que se genera. Se ha realizado estudios de la forma en que pueden ser tratados (Parr y col., 1978) determinando que uno de los métodos más conveniente es el composteo, que permite la destrucción de los patógenos y el abatimiento de los malos olores. Los lodos contienen de 40 a 60% de materia orgánica (Parr y col., 1978), siendo una fuente valiosa de macro y micronutrientes. Para llevar a cabo el proceso de composteo con los lodos activados, es necesario utilizar un agente de volumen, que le confiere porosidad a la mezcla para mantener condiciones aerobias (Nakasaki y col., 1986).

### 2.1.1. Variables físico-químicas del proceso de composteo.

**A. Temperatura.** Dependiendo de las temperaturas que se alcanzan, el proceso se divide en cuatro etapas básicas: (i) **mesofílica**, en donde se presentan temperaturas entre 10 y 45°C; (ii) **termofílica**, temperaturas mayores a 45°C; (iii) **enfriamiento**, etapa en la que el material ya no puede conservar el calor, y empieza a disminuir la temperatura hasta llegar a la temperatura ambiente.; (iv) y **maduración**, que es la etapa más larga, en la cual se degrada la lignina y estabiliza el material.

La descomposición óptima se lleva a cabo entre 55 y 60°C (Marugg y col., 1993; Pereira y col., 1986; Bach y col., 1984; Sikora y col., 1983). Arriba de 65°C, empieza a observarse desactivación microbiana (McKinley y Vestal, 1984).

**B. pH.** El pH del material inicial se sugiere entre 6.0 a 8.5 (Fitzpatrick, 1993). En la primera etapa del proceso se observa siempre una disminución de pH, debido a la formación de ácidos orgánicos provenientes de la fuente de carbono de fácil degradación (Zucconi y de Bertoldi, 1986; Ferrari, 1986). Cuando se ha consumido el carbono de fácil degradación y la temperatura del material aumenta, el pH se vuelve alcalino, alcanzado muchas veces valores hasta de 9.0,

debido a que en esta etapa se descomponen las proteínas y aminoácidos, formando amoníaco (Zucconi y de Bertoldi, 1986; Ferrari, 1986, Pereira y col., 1986). En la etapa de maduración el pH descendiendo paulatinamente hasta valores neutros.

**C. Relación carbono/nitrógeno.** Uno de los aspectos importantes del balance de los nutrientes totales se expresa como la relación carbono/nitrógeno (Nakasaki y col., 1992). Esta relación ha sido ampliamente estudiada y se ha determinado que la relación óptima se encuentra entre 25:1 y 35:1 (Fitzpatrick, 1993, Nakasaki y col., 1992). Valores mayores serían consecuencia de un alto contenido de fibra, propiciando una descomposición más lenta; y por otro lado, valores menores traerían como consecuencia una pérdida excesiva de nitrógeno (Fitzpatrick, 1993; Gray y Biddlestone, 1974).

La relación carbono/nitrógeno ha sido utilizada como una medida de la estabilidad de la composta madura, y debe encontrarse entre 10 y 20 (Schumann y col., 1993; Iglesias y Pérez, 1992; Zucconi y de Bertoldi, 1986).

**D. Humedad.** La descomposición de la materia orgánica depende en gran medida de la presencia de la suficiente agua, que permita la actividad microbiológica, facilitando el transporte de los nutrientes disueltos y de los productos de desecho (Crawford, 1983). Fitzpatrick (1993), recomienda que el proceso debe mantenerse en el rango de 40-65% de humedad para asegurar la descomposición. Para favorecer y mantener humedades dentro de este rango se ha sugerido utilizar (Minnich y Hunt, 1979; Gray y Biddlestone, 1974) aserrín y bagazo de caña como agentes que retienen agua.

**E. Aireación.** Es necesaria una aireación adecuada en el sistema, de tal forma que se suministre el oxígeno necesario para que los microorganismos se desarrollen. Si el aire no es distribuido correctamente o en cantidad suficiente, puede llevar al sistema a condiciones anaerobias, lo que traería como consecuencia una disminución en la velocidad de descomposición del material y además la evolución de malos olores. Por otro lado, si se le agrega más aire del necesario, traería como resultado el enfriamiento y secado del material (Nakasaki y col., 1990; Crawford, 1983; Gray y Biddlestone, 1974). En la primera etapa del proceso es necesario una menor cantidad de aire, pero cuando se alcanza la etapa termofílica, es necesario agregar una mayor cantidad de aire para remover el calor generado y suplir el oxígeno consumido en su generación (Marugg y col., 1993; Hogan y col., 1989). Haug (1979) ha determinado que es necesario agregar 10 a 30 veces más aire para enfriar el material que el necesario estequiométricamente para que se lleve a cabo la reacción de oxidación de la materia orgánica (1.71 litros de aire/gramo de lodo).

**F. Actividad de agua (Aw).** La Aw del soporte o sustrato es una forma de cuantificar los requerimientos de agua de los microorganismos que allí se desarrollan. En muchos casos la actividad de agua en el rango de 0.80-0.99 tiene un efecto en la fisiología de los microorganismos (Gervais, 1989). Rose (1977), ha reportado que los microorganismos en general pueden crecer entre valores de 0.99 a 0.63 de actividad de agua; pero las bacterias lo hacen en un rango de 0.99 a 0.93, valores menores a estos causan inhibición en su crecimiento, disminuyendo el nivel de degradación del material a compostear, pues las bacterias son la población más abundante en la composta.

### 2.1.2. Generación de calor metabólico.

El calor generado en el proceso de composteo se debe al metabolismo de los microorganismos que degradan el material orgánico, y que a la vez indica el grado de descomposición del material. De una forma general, el calor producido proviene de la oxidación de la fuente de carbono. En los sistemas biológicos, puede cuantificarse la cantidad de energía producida con las ecuaciones básicas de transferencia de calor, es decir que el calor generado (calor metabólico), puede perderse por medio de los mecanismos de conducción, convección y evaporación del agua.

### 2.1.3. Variables biológicas.

**A. Microorganismos en el material a compostear.** El proceso de composteo es un proceso dinámico que se lleva a cabo debido a la combinación de actividades de una sucesión rápida de microorganismos, los cuales están situados en un ambiente de duración limitada y cada uno es activo en la descomposición de un tipo particular o grupo de materiales orgánicos (Gray y Biddlestone, 1974).

En la Tabla 2.1. se presentan los datos de algunos organismos involucrados en el composteo (Gray y Biddlestone, 1974).

**a. Bacterias.** Están presentes a lo largo de todo el proceso de composteo, tal como se observa en la Tabla 2.2., sin embargo son particularmente importantes al inicio, pues a ellas se les atribuye la rápida degradación del material orgánico y por lo tanto la elevación de la temperatura (Stentiford y Dodds, 1992). Al inicio del proceso pueden aislarse una gran cantidad de ellas, en las que se incluyen *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Achromobacter*, *Streptococcus* y *Escherichia coli* (Finstein y Morris, 1975). Cuando la temperatura del material a compostear se eleva, se observa que predominan los *Bacillus* (Strom, 1985; Finstein y Morris, 1975). Si la temperatura

se encuentra arriba de los 60°C la fisiología microbiana se ve afectada y las células vegetativas son reemplazadas por esporas resistentes al calor (Finstein y Morris, 1975).

**TABLA 2.1.** Organismos involucrados en el composteo (Gray y Biddlestone, 1974).

		Número por gramos de composta
Microflora	Bacteria	10 <sup>8</sup> - 10 <sup>9</sup>
	Actinomicetos	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>8</sup>
	Hongos	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>6</sup>
	Algas	< 10 <sup>4</sup>
	Virus	?
Microfauna	Protozoarios	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>
Macroflora	Hongos, e.g. <i>Coprinus</i> spp	
Macrofauna	Nemátodos	
	Hormigas	
	Lombrices	
	Gusanos	

**b. Actinomicetos.** Están asociados con la etapa termofílica del composteo (ver Tabla 2.2.), pudiendo atacar la hemicelulosa y celulosa (Crawford, 1983). La razón por la que las bacterias mueran, mientras que la población de actinomicetos crece en el material a compostear, es que los actinomicetos tienen la capacidad de producir antibióticos, sustancias que inhiben el crecimiento bacteriano (Stentiford y Dodds, 1992; Minnich y Hunt, 1979).

Los actinomicetos son importantes para la formación del humus (producto final del proceso de composteo), causando el olor característico a tierra húmeda en la composta. La especie dominante a temperaturas de 45-50°C es la *Streptomyces*; aislándose también actinomicetos termofílicos dominantes arriba de los 63°C, tales como *Thermoactinomyces*, *Thermomonospora* y *Micropolyspora*, aún cuando se considera que son más importantes en la fase de maduración, en la que degradan los compuestos más complejos (Stentiford y Dodds, 1992).

**c. Hongos.** Ayudan también al incremento inicial de la temperatura; los que sobreviven arriba de los 40°C son los hongos termofílicos que descomponen el sustrato de difícil degradación; arriba de los 65°C, la actividad de los hongos termofílicos cesa, debido a que es la temperatura límite para el crecimiento de los organismos eucariotes (Crawford, 1983), luego que la temperatura vuelve a bajar, estos aparecen nuevamente (Gray y Biddlestone, 1974). Los hongos

juegan un papel importante en la descomposición de la celulosa y otros materiales complejos de carbono (Stentiford y Dodds, 1992).

TABLA 2.2. Población microbiana durante el composteo (Haug, 1993).

Microorganismos	Número/gramo composta húmeda			No. especies identificadas
	Mesofílica T < 40°C	Termofílica 40 - 70°C	Mesofílica 70°C -enfriamiento	
Bacteria				
Mesofílicas	10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>11</sup>	6
Termofílicas	10 <sup>4</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup>	1
Actinomicetos				
Termofílicos	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup>	14
Hongos				
Mesofílicos	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	18
Termofílicos	10 <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	16

**d. Microorganismos patógenos.** Se han encontrado en los lodos activados, estiércoles, desechos y otros sustratos utilizados en el proceso, una gran variedad de formas patógenas de bacterias, protozoarios y metazoarios y además, en los lodos activados se han encontrado materias fecales. Entre los microorganismos patógenos pueden nombrarse las bacterias entéricas (enterobacterias), que incluyen los agentes causantes del cólera, tifoidea y la fiebre paratifoidea, y algunas relacionadas con enfermedades de disentería.; entre los virus encontrados está el de la hepatitis A. También se han encontrado parásitos intestinales que incluyen a la *Entamoeba histolytica*, varios nemátodos, tales como la *Ascaris lumbricoides* y sistosomas. Haug (1993) y Stentiford y Dodds (1992) presentan una extensa lista, en la que muestra los diferentes microorganismos patógenos y las enfermedades que producen. Durante el composteo se destruyen los microorganismos patógenos debido a que se alcanzan temperaturas arriba de los 50°C por un período prolongado.

**B. Macroflora y macrofauna en el proceso de composteo.** Se ha discutido mucho acerca de la contribución de las bacterias y los hongos al proceso de composteo, pero estos microorganismos no lograrían su papel sin la presencia de otros organismos que les facilitan la tarea participando activamente y en muchas ocasiones en forma simbiótica.

El **plancton** está formado por organismos superiores en complejidad celular a las bacterias. Su tamaño varía desde pequeños organismos unicelulares apenas mayores que las bacterias, hasta formas mucho más grandes fácilmente visibles a simple vista. Unos pertenecen al reino animal y otros al vegetal; algunos son capaces de moverse con independencia y otros no. Entre los grupos

más importantes se tienen a los protozoarios, nemátodos, algas y amibas, entre otros (Burges, 1987).

## 2.2 SISTEMAS DE COMPOSTEO A NIVEL LABORATORIO.

Debido a la heterogeneidad del proceso de composteo, y que además involucra la interacción de muchas variables, se dificulta su estudio y control; por ello se hace necesario un sistema a escala laboratorio, en el que se pueda llevar a cabo el proceso, y además permita cuantificar los cambios de las variables y la interacción entre ellas, de una manera reproducible. A principios de la década de los 80 se ha intensificado el estudio más detallado de lo que es el proceso de composteo, de tal forma que se pueda tener un proceso mejor descrito y controlado.

Han sido utilizados varios modelos de reactores a escala laboratorio, en los que se han especificado y controlado de diversas formas la temperatura, humedad y aireación, con el fin de medir cambios en las poblaciones microbianas, grado de descomposición, efecto de la temperatura, nitrógeno, oxígeno, etc., y poder de esta forma plantear relaciones que describan y predigan los cambios que ocurren.

Uno de los primeros estudios de sistemas de laboratorio de composteo lo presentaron Mote y Griffis (1979); en él se composteó aproximadamente 1 kg de material húmedo dentro de un recipiente cilíndrico de acero inoxidable, introducido en un baño de agua con temperatura controlada evitando así pérdidas de calor. Con este sistema se realizaron mediciones de temperatura y evolución de  $\text{CO}_2$  en la corriente gaseosa a la salida, demostrando con ello que el aumento de la temperatura en el material a compostear se debió únicamente al calor generado internamente.

Posteriormente fueron apareciendo otros trabajos, en los que se trató de mejorar el diseño de los sistemas, haciéndolos más simples y que de alguna forma pudieran ser automatizados, logrando además reproducibilidad en los resultados. Ashbolt y Line (1982) presentan un sistema constituido por seis reactores de cloruro de polivinilo (PVC), con capacidad de 4 litros cada uno y agitados constantemente con un remo, calentados en baño de agua incrementando la temperatura de  $5^\circ\text{C}$  diariamente hasta alcanzar los  $62^\circ\text{C}$ , prolongando así la etapa termofílica del proceso (por un período de 35 días); la cantidad de aire suministrado fue constante durante todo el proceso y el material humedecido con el agua capturada en un condensador conectado a la salida del reactor a  $2^\circ\text{C}$ . Con este sistema se compararon dos relaciones carbono/nitrógeno, midiendo la actividad de celulasas y la evolución de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  en la corriente gaseosa a la salida. Se determinó que la máxima actividad metabólica corresponde a la etapa termofílica del proceso; también, con relaciones carbono/nitrógeno menores a 45, se obtuvo un mayor grado de utilización de la

celulosa; el material presentó pérdidas considerables de nitrógeno en forma de amoníaco, atribuyéndoselo a la agitación constante del material.

Sikora y col. (1983) diseñaron un sistema en el que se utilizó el concepto de autocalentamiento, con el cual se logró minimizar la pérdida de calor aislando el material dentro de un medio que se mantuvo 0.1 a 0.2°C abajo de la temperatura de la masa a compostear, limitando la temperatura máxima a 72°C. El reactor fue de acero inoxidable de 25 cm de altura y 20 cm de diámetro. El aire se humedeció y calentó antes de introducirse al reactor. Por ser un sistema hermético solamente se pudo hacer mediciones de los gases a la salida ( $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ ) y de la temperatura. Del material sólido se tomaron muestras al inicio y final del proceso. Se obtuvo una pérdida de 6 a 10% de nitrógeno en forma de amoníaco; la producción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  están correlacionadas con los picos de temperatura del material; observándose también que la evolución de  $\text{NH}_3$  ocurre cuando la evolución de  $\text{CO}_2$  disminuye.

En 1984, Bach y col. presentan un sistema de composteo a nivel laboratorio en el que se midió la velocidad de composteo de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, expresada en términos de la velocidad de evolución de  $\text{CO}_2$ . El reactor se construyó de PVC, con diámetro de 26 cm y altura de 30 cm; el material introducido se mezcló constantemente con un agitador de paletas mecánico a razón de 1 r.p.m. El aire dentro del reactor se calentó con un calentador eléctrico y se movió con un ventilador, se pasó por un algodón saturado de agua minimizando pérdidas de ésta en el proceso. La temperatura del aire se controló con una predeterminada. La aerobividad se mantuvo suministrándole aire a un flujo constante de 800 ml/min. El muestreo del material sólido a compostear se realizó de un orificio que se encontraba en la pared del reactor. Se determinó que la temperatura óptima del proceso fue alrededor de los 60°C y el contenido de humedad del 40-65%.

En un trabajo posterior Bach y col. (1985) reportaron que el reactor con mezclado constante solamente fue consistente en sus resultados cuando existe una gran proporción del agente de volumen para asegurar la operación del agitador durante todo el proceso; por lo que utilizaron un nuevo diseño, que fue un tipo de reactor cilíndrico de PVC y dimensiones: 30 cm de diámetro y 40 cm de altura. El reactor se aisló con espuma de estireno y la diferencia entre la temperatura de la base y la de la superficie se mantuvo a 2°C como máximo. El aire se suministró en la parte inferior a dos velocidades: en la primera etapa se usó un flujo bajo de 0.4 l/min, y luego, en la etapa termofílica a 4 l/min. Se evaluó nuevamente el curso de la degradación midiendo el  $\text{CO}_2$  a la salida. Durante el experimento se abrió el reactor para tomar las muestras y el material se mezclaba de forma manual. Los resultados obtenidos mostraron que las cinéticas de  $\text{CO}_2$  son distintas dependiendo del tipo de lodos utilizados. Se determinó que la temperatura óptima del proceso fue 60°C, y que los agentes de volumen con área superficial grande fueron más efectivos en la velocidad de reacción.

Desde 1985 hasta la fecha un grupo de investigadores japoneses, presidido por Nakasaki ha utilizado el mismo sistema de composteo descrito por Bach y col. (1985). Enfatizando los estudios en el control de la temperatura por medio del gasto de aire utilizado: al inicio del proceso utilizaron 0.4 l/min de alimentación, cuando la temperatura fue mayor a 60°C se cambió al mayor gasto de 4 l/min para mantener la temperatura predeterminada de 60°C. La cantidad de material empacado en el reactor fue de 3 a 5 kg. En dos reportes (1985a y 1985b), se presentó el estudio de las diferentes poblaciones que se suceden durante el proceso de composteo, utilizando como inóculo composta madura producida en experimentos anteriores. Estableciendo que la evolución de CO<sub>2</sub> al inicio de la etapa termofílica se debió a las bacterias termófilas y en el período final termofílico, su desarrollo se debió a los actinomicetos termófilos. También concluyeron que la forma vegetativa de las bacterias mesofílicas presentaron propiedades de termotolerancia a 60°C, formando colonias, pero no mostraron actividad respiratorio a ésta temperatura.

Luego realizaron varios experimentos (1985c, 1985d, 1986, 1987) en que se estudió el efecto del inóculo, temperatura, agente de volumen y secado del material, respectivamente, en la sucesión de microorganismos y el grado de descomposición del material, utilizando para ello resultados de la evolución de CO<sub>2</sub>. No se observó ningún efecto del inóculo en el grado de descomposición del material a compostear y en la calidad del producto final; pero si se determinó que adicionando algún agente de volumen se incrementa la interfase aire-sólido donde los microorganismos pueden crecer y formar colonias. Nuevamente se comprobó que la temperatura óptima para el proceso fue de 60°C

Siguiendo la misma línea de investigación este grupo japonés, utilizó basura doméstica para evaluar el efecto del inóculo (1988), transformación del nitrógeno durante el proceso (Morisaki y col., 1989), efecto de la concentración de oxígeno (1990), efecto de la relación C/N (1992), en el desarrollo de los microorganismos y la evolución de CO<sub>2</sub>. En cuanto al efecto de la utilización de inóculo para compostear basura doméstica se encontró que aceleró tanto la etapa mesofílica como la termofílica. Añadiendo un agente de volumen se redujo la pérdida de nitrógeno por volatilización de amoníaco. Y valores iniciales de la relación carbono/nitrógeno alrededor de 22 aceleraron la velocidad de degradación del material a compostear y el crecimiento de las bacterias termófilas

Utilizando lodos activados para compostearlos e inóculo composta madura, Bach y col. (1987) realizaron a nivel laboratorio, con el sistema descrito en los párrafos anteriores, una investigación sobre los diferentes mecanismos de transferencia de calor que se presentan en el proceso de composteo. En este trabajo no se mostró cual es el efecto de cada uno de ellos en cada etapa del proceso, presentando así un balance global de energía, en el que se estableció que la cantidad de calor perdida por evaporación fue mayor cuando aumentó el gasto de aire para mantener la temperatura control.

Hogan y col. (1989) presentaron un sistema de composteo a nivel laboratorio, tratando de mantener un alto grado de actividad aeróbica, removiendo el exceso de calor por ventilación forzada para mantener la temperatura favorable (50°C) para el crecimiento microbiano. También se controló el flujo conductivo de calor a través de las paredes del reactor, manipulando la temperatura del aire utilizado en el incubador. Para evitar el secado del material se saturó el aire con agua a 24°C antes de entrar al reactor. El reactor fue un cilindro de 45 cm de altura y 20 cm de diámetro, que poseía además un piso falso por donde se introducía el aire saturado, que chocaba con un deflector para evitar que el aire se distribuyera en las paredes del reactor. Además el reactor se aisló con espuma de poliuretano. Se midió la actividad biológica en términos del calor perdido por vía conductiva y convectiva y la producción de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Se logró obtener comportamientos típicos del proceso de composteo (gradientes de temperatura, contenido de oxígeno y agua removida) con el sistema modelo utilizado.

Magalhães y col. (1993), presentan un sistema de composteo a escala laboratorio, con el que se estudió las condiciones más críticas del composteo, tales como son la aireación y conservación del calor. Para ello se utilizaron dos reactores cilíndricos, uno grande, construido con el diseño de Hogan y col. (1989), con capacidad de 1 kg de material (base seca) y uno pequeño, que era un recipiente cilíndrico de vidrio de 12 cm de altura y diámetro interno superior de 7.5 cm e inferior de 6.2 cm y aislado con fibra de vidrio, con y 50 g de capacidad (base seca). Se realizaron estudios sobre el proceso de composteo en la eliminación de contaminantes como TNT (2,4,6-trinitrotolueno) y RDX (hexahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazina). En ambos reactores, el aire era saturado con agua a 30°C con un gasto constante de aire. Se controló la temperatura del material, manteniéndola a 55°C. Se midió CO<sub>2</sub> como indicativo de la actividad microbiana. Con el sistema utilizado, se obtuvieron resultados típicos del proceso a escala industrial, trayendo como ventaja este tipo de sistemas en que minimizan los costos y el peligro de su manejo al utilizar los contaminantes en pequeñas cantidades.

Como se observa los sistemas de composteo a nivel laboratorio son prácticos en su uso y manejo, además que proporciona resultados más descriptivos que no se podrían obtener en sistemas a escala industrial, por lo que este trabajo se enfocó en el estudio del proceso de composteo a nivel laboratorio con el fin de poder estudiar la interacción entre las variables que intervienen y poder determinar la cantidad de calor metabólico que se produce durante las tres primeras etapas del proceso.

***PARTE II.***

***MATERIALES Y METODOS***

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

#### 3.1. SISTEMA MODELO EXPERIMENTAL.

Para llevar a cabo el proceso de composteo se utilizó un sistema modelo, que constó de:

- A. Material modelo a compostear.
- B. Reactor prototipo y columnas de fermentación sólida (Raimbault y Alazard, 1980).
- C. Medio de temperatura controlada del reactor y columnas.
- D. Control diferencial de temperatura.

##### 3.1.1. Material modelo.

Se utilizaron en la mezcla a compostear las siguientes materias primas:

- Lodos residuales, obtenidos de la planta de tratamiento de agua de la UNAM, utilizados como fuente de inóculo y nitrógeno.
- Bagacillo de caña de azúcar, obtenido del Ingenio Casasano, en Cuautla, Morelos. Se usó como agente de volumen y fuente de carbono de difícil degradación.
- Medio de cultivo, utilizando sacarosa como fuente de carbono que fuera fácilmente degradada por los microorganismos; urea como fuente de nitrógeno; difosfato de potasio; y una solución de elementos traza, detallado en la Tabla 3.1.

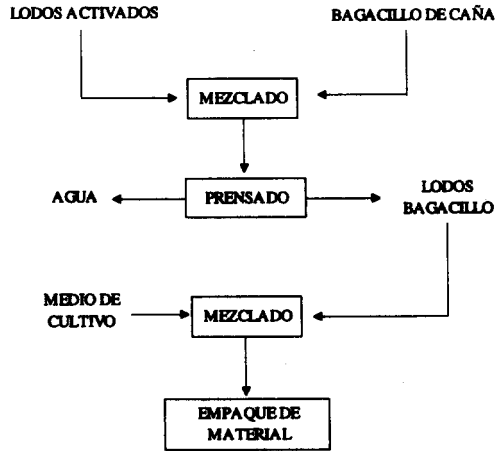
**TABLA 3.1.** Solución de elementos trazas utilizados en la mezcla a compostear (Goodhue y col., 1986).

Sulfato de magnesio · 7 H <sub>2</sub> O	25.00 g
Sulfato ferroso · 7 H <sub>2</sub> O	2.80 g
Sulfato de manganeso · H <sub>2</sub> O	1.70 g
Cloruro de sodio	0.60 g
Cloruro de calcio · 2H <sub>2</sub> O	0.10 g
Molibdato de sodio · 2H <sub>2</sub> O	0.10 g
Sulfato de zinc · 7H <sub>2</sub> O	0.60 g
Acido clorhídrico, 1M	1.00 l

Por el alto contenido de agua en los lodos residuales fue necesario realizar un pretratamiento a la mezcla a compostear para eliminar el exceso de agua. En la Figura 3.1. se muestra el diagrama de flujo del pretratamiento de la mezcla.

Los lodos y el bagacillo de caña se mezclaron homogéneamente en el mismo instante en que los lodos fueron obtenidos de la planta de tratamiento de agua. Luego de mezclarlos fueron prensados a una presión de 1000 kg/cm<sup>2</sup>. El agua extraída fue desechada y a la torta se le agregó el medio de cultivo que contenía las sales trazas, la sacarosa, la urea y el difosfato de potasio. Se

procedió luego a mezclar uniformemente la torta y el medio, para luego empaquetar el material en las columnas y el reactor.



**FIGURA 3.1.** Pretratamiento de la mezcla a compostear.

### 3.1.2. Reactores.

**A. Reactor prototipo.** Es un cilindro de acrílico de 30 cm de altura y 20 cm de diámetro interno; la altura útil de empaque del reactor fue de 20 cm. Se colocó sobre otro cilindro de acrílico de 10 cm de altura y 20 cm de diámetro por donde se introdujo el aire saturado. Entre el reactor y la base existe un piso falso de malla de acero inoxidable, con abertura de 2 mm, sobre el que se depositó el material a compostear. Para permitir una mejor distribución del aire en el material, sobre este piso se colocó un anillo de hule que sirvió como deflector.

La base del reactor cuenta con 3 orificios para aireación y medición de la temperatura del aire de entrada. También a lo largo del reactor existen orificios para medir temperaturas en diferentes zonas y otro para capturar la corriente gaseosa a la salida y obtener la cinética de  $\text{NH}_3$ . Para evitar fugas o pérdidas de la corriente gaseosa, éste se selló herméticamente con una tapa de acrílico.

En la Figura 3.2. se presentan la vista frontal de reactor, en la que se presenta las alturas en que se midió la temperatura y la vista superior de la base del reactor, mostrándose la malla en que se depositó el material y el deflector utilizado.

**B. Columnas de Fermentación.** Para seguir las cinéticas de las variables físico-químicas así como las microbiológicas del proceso se utilizaron columnas de vidrio (Raimbault y Alazard, 1980) de 15 cm de altura y 2 cm de diámetro interno. Estas columnas se colocaban sobre un

burbujeador, en la cual se introducía el aire al sistema. En la Figura 3.3. se muestra el esquema de las columnas y los burbujeadores utilizados.

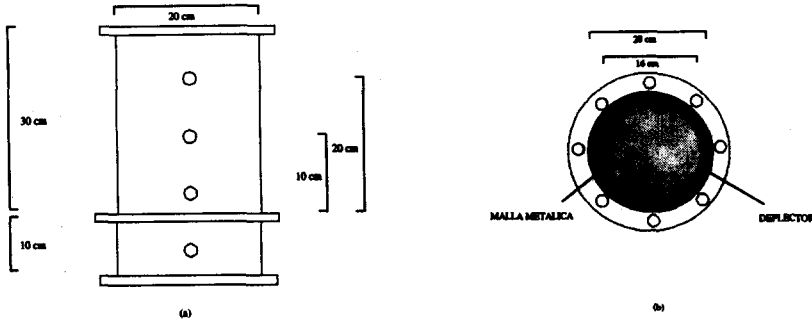


FIGURA 3.2. (a) Vista frontal del reactor de acrílico; (b) vista superior de la base del reactor.

En la base de la columna se depositaba algodón para evitar que el material pasara a través del orificio inferior de la columna. El material a compostear se colocó, además, sobre una malla plástica de 0.5 mm de abertura. De igual forma, en la parte superior del material se puso otra malla de plástico y algodón para atrapar el agua condensada de las columnas y evitar también que agentes externos al material modificaran sus características.

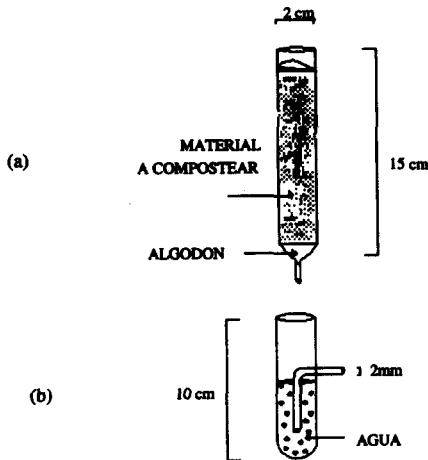


FIGURA 3.3. (a) Columnas de fermentación tipo Raimbault; (b) burbujeadores.

### **3.1.3. Condiciones de operación.**

**A. Densidad de Empaque.** Para que las características del material a compostear fueran homogéneas tanto en las columnas como en el reactor se empacó con una densidad para ambos de  $500 \text{ kg/m}^3$ , asegurando una distribución homogénea del aire dentro del material.

**B. Aireación.** La cantidad de aire suministrado se estableció dependiendo de la cantidad de material húmedo a compostear que se tenía al inicio del proceso, por lo que se utilizó la medida de  $\text{vkgm}$ , que son los litros de aire necesarios por kilogramo de materia húmeda por minuto. Para los experimentos se utilizó 3  $\text{vkgm}$ , tal como es recomendado por Roussos y col. (1993), asegurando que se mantendría aerobio el sistema durante todo el proceso.

El aire pasaba primero por unos burbujeadores con agua para saturar el aire de entrada del reactor y columnas. El aire entraba a los burbujeadores a una presión de  $1.2 \text{ kg/cm}^2$ .

#### **C. Condiciones iniciales del material.**

Las condiciones iniciales se fijaron en los siguientes rangos:

- pH: 7.0 a 7.5
- Humedad: 70 - 75%
- Relación carbono/nitrógeno: 30 -35
- Fuente de carbono de fácil degradación: 30% del total.

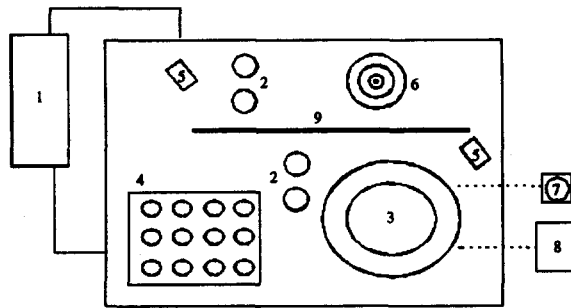
#### **D. Aislamiento del sistema modelo.**

Las columnas de fermentación, el reactor prototipo y los burbujeadores fueron introducidos en un medio de temperatura controlada, con el fin de mantenerlos a temperatura controlada. En los experimentos realizados se utilizaron dos medios aislantes: agua y aire.

**a. Medio de temperatura controlada agua.** El reactor, las columnas y burbujeadores se introdujeron en un recipiente de dimensiones:  $0.5 \times 0.6 \times 0.37 \text{ m}$ , el cual se llenaba de agua, que era calentada por medio de un calentador con recirculación con agua marca MT Lauda. En la Fotografía 3.1. se muestra el sistema de composteo cuando se utilizó agua como medio de temperatura controlada

**b. Medio de temperatura controlada aire.** Cuando se utilizó el aire como medio de temperatura controlada, se colocaron las columnas, reactor y burbujeadores en una cámara aislada con dos paredes de vidrio y dos de policarbonato, base de vidrio, y como tapa se utilizó un domo de acrílico. Las dimensiones de la cámara eran de  $0.7 \times 0.7 \times 0.9 \text{ m}$ . Para elevar la temperatura del aire se utilizó una hornilla de 800W de potencia, regulándola con un reóstato dependiendo de las temperaturas que querían obtenerse en la cámara. Para recircular el aire se usaron dos ventiladores y un deflector para homogeneizar la temperatura dentro de la cámara. En la Figura 3.4. se muestra un esquema de la distribución dentro de la cámara aislante. Se presentan en las Fotografías 3.2 y 3.3 el sistema modelo utilizando aire como medio de temperatura controlada.

A la cámara aislante se le conectó un equipo de acondicionamiento y lavado de aire (Murillo y col., 1994) mostrado en la Fotografía 3.4., con el fin de cambiar constantemente el aire y evitar además la acumulación de olores dentro de la cámara. El extractor de aire encendía por 30 minutos cada dos horas, intercambiando el aire a una velocidad de 1.2 m/s, con lo que se lograba cambiar el aire de la cámara 150 veces al día. El aire que pasaba por ella era lavado y humedecido.



**FIGURA 3.4.** Vista superior de la cámara aislante y la disposición de los diferentes componentes: (1) Acondicionador de aire; (2) burbujeadores del reactor; (3) reactor de acrílico; (4) columnas de fermentación; (5) ventiladores; (6) calentador; (7) sistema de captura de amoníaco; (8) medidor de temperatura; (9) deflector.

**E. Control diferencial de temperatura.** En los experimentos en que no se mantuvo constante la temperatura del medio de temperatura controlada se utilizó un controlador diferencial de temperatura (CDT).

El CDT, funciona en base a la comparación de la temperatura del material dentro del reactor (que fue tomada como control) y la del medio de temperatura controlada; cuando la temperatura del medio de temperatura controlada era menor que la del material, el CDT hacía que se encendiera el calentador, hasta que la temperatura del medio de temperatura controlada fuera 2 a 4°C menor (según la temperatura de referencia) que la del material. En la Figura 3.5. se muestra el sistema de control de temperatura utilizado en los proceso de composteo.

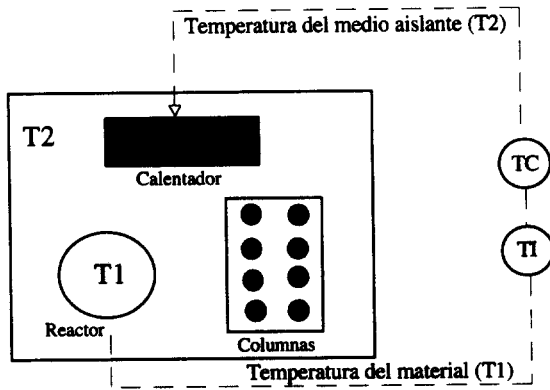
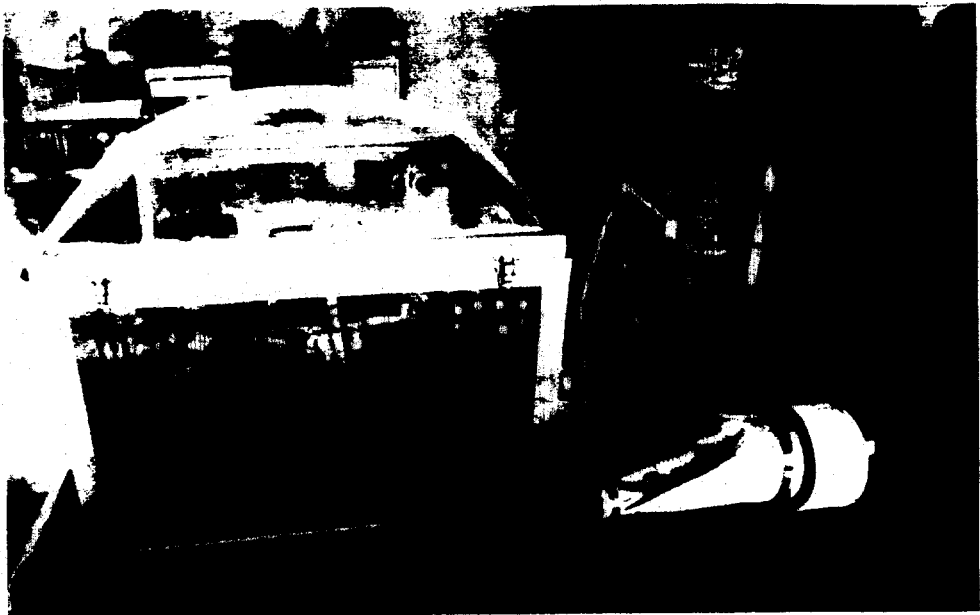


FIGURA 3.5. Diagrama del control diferencial de temperatura



**FOTOGRAFIA 3.1.** Sistema modelo utilizando como medio de temperatura controlada agua.



**FOTOGRAFIA 3.2.** Sistema modelo en que se usó aire como medio de temperatura controlada.



**FOTOGRAFIA 3.3.** Acercamiento de los columnas de fermentación y el reactor prototipo.



**FOTOGRAFIA 3.4.** Sistema de acondicionamiento del aire de recirculación de la cámara

## **4. ANALISIS EXPERIMENTAL.**

### **4.1. ANALISIS FISICO-QUIMICOS.**

#### **4.1.1. Determinación de nitrógeno.**

Para la determinación del contenido total de nitrógeno (tanto orgánico como amoniacal), se utilizó el método de **Kjeldahl** (APHA, 1989).

#### **4.1.2. Determinación de carbono.**

Se determinó la cantidad de material volátil por el análisis de cenizas (APHA, 1989). Se consideró que en la composta el carbono es el 50% de la materia volátil (Stentiford y Dodd, 1992; Zucconi y de Bertoldi, 1986).

#### **4.1.3. Determinación del contenido de humedad.**

Se secó la muestra hasta peso constante a 65°C, aproximadamente 24 horas, en un horno Felisa, modelo 241.

#### **4.1.4. Determinación del pH.**

Se pesó un gramo de muestra húmeda y se le agregaron 9 ml de agua destilada. Se mezcló perfectamente y se dejó reposar por espacio de 30 minutos y luego se leyó el pH directamente en un medidor de pH Conductronic pH20.

#### **4.1.5. Determinación de la actividad de agua.**

La muestra húmeda se depositó en unas cajuelas plásticas especiales para la determinación de la actividad de agua en el equipo CX-1 (Decagon), que calcula la actividad de agua por medio se un sistema de cómputo interno que mide la temperatura de la superficie y el punto de rocío.

#### **4.1.6. Determinación de azúcares solubles.**

Fueron medidas por el método colorimétrico modificado de fenol sulfúrico (Dubois, 1956).

##### **A. Reactivos.**

- Sacarosa para preparar la curva de calibración
- Solución de fenol-sulfúrico, preparada con 1 mg de fenol por cada ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

##### **B. Procedimiento.**

Para la determinación de los azúcares solubles se realizó una curva patrón con sacarosa, realizando diferentes diluciones, para tener concentraciones desde 0.0 g/l de sacarosa hasta 1.0 g/l.

Para determinar la cantidad de azúcares solubles en el material, se pesó 0.1 g de materia seca y se le agregaron 10 ml de agua destilada. Se mezclaron perfectamente y se filtró. Del sobrenadante se tomó una alícuota de 0.5 ml y se le añadió 0.5 ml de agua destilada.

Tanto al ml de las muestras como al de las soluciones para la curva patrón se le agregó 2 ml de solución de fenol-sulfúrico dentro de un baño de hielo, para evitar el calentamiento excesivo de la solución. Se dejó reposar 5 minutos y luego se introdujo en un baño de agua hirviendo por 10 minutos más. Se dejaron enfriar las muestras y se leyó la concentración de azúcares solubles a 460 nm en un espectrofotómetro Shimadzu UV-160A.

#### **4.1.7. Medición de temperatura.**

Para la determinación de la temperatura del material en las diferentes posiciones del reactor y del medio aislante, se utilizaron termopares tipo K conectados a un monitor de temperatura Cole-Parmer.

#### **4.1.8. Determinación de amoníaco.**

El nitrógeno perdido en la corriente gaseosa en forma de amoníaco a la salida del reactor se capturó en una solución de ácido bórico al 5% p/v; cuando el pH de la solución era de 4.5 fue titulada con  $H_2SO_4$ , 1N, hasta que el pH era de 2.5 (Sikora y col., 1983).

## **4.2. ANALISIS MICROBIOLÓGICOS.**

Se determinaron las cinéticas de crecimiento de poblaciones de microorganismos características en el proceso de composteo: bacterias mesófilas, bacterias coliformes, bacterias termófilas, actinomicetos mesófilos, actinomicetos termófilos y hongos.

#### **4.2.1. Preparación de la muestra.**

Bajo condiciones de asepsia se suspendió un gramo de muestra húmeda en 9 ml de glicerol estéril al 30%. El tubo de ensayo que contuvo esta primera dilución (1:10) se homogeneizó por 5 minutos y se dejó reposar 1 minuto; luego el sobrenadante se repartió en viales de 1.5 ml que fueron guardados a  $-4^{\circ}C$  hasta su utilización. Las diluciones se realizaron con agua peptonada al 0.1%.

#### **4.2.2. Aislamiento, medios de cultivo y cuantificación de microorganismos.**

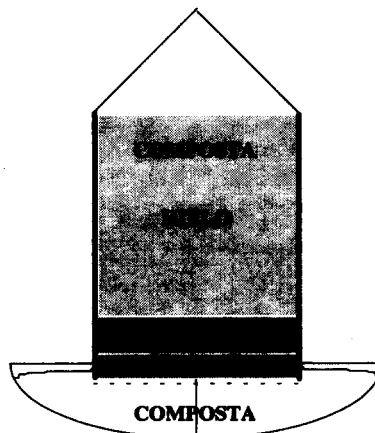
El cultivo se llevó a cabo en superficie, inoculando con 0.05 ml de muestra. En la Tabla 4.1. se muestra las temperaturas de incubación, los medios de cultivo utilizados y el tiempo en que se realizó el conteo de las colonias en el contador Quebec, modelo 3325.

**TABLA 4.1.** Temperaturas de incubación, medios de cultivo utilizados y tiempo de conteo para las diferentes poblaciones.

Población	Medios de cultivo	Temperatura incubación (°C)	Tiempo de conteo (día)
Bacterias mesófilas	estándar	30	1
Bacterias termófilas	estándar	60	1
Bacterias coliformes	Mac-Conkey	30	1
Hongos	papa dextrosa	30	2
Actinomicetos mesófilos	extracto levadura y malta	30	7
Actinomicetos termófilos	extracto levadura y malta	60	7

#### 4.3. ANÁLISIS DE LA DENSIDAD POBLACIONAL DE MACROFAUNA Y MACROFLORA.

Se utilizó el método Uhlig modificado (Téllez, 1991), esquematizado en la Figura 4.1., para procesar las muestras. Para ésto se elaboró un filtrador de plancton a partir de un cilindro de vidrio de 3 cm de diámetro y de 15 cm de longitud. En uno de sus extremos se fijó una malla fina de 250 micras de poro, aproximadamente, que quedó completamente estirada. En este sitio se colocaron tres capas de diferente contenido. La capa inferior contenía 3 g de muestra húmeda lubricada con agua estéril. La capa intermedia de algodón con un grosor igual a la de la muestra. Y la capa superior de hielo seco y picado en trozos grandes, cuyo grosor igualaba a la de algodón.



**FIGURA 4.1.** Método de Uhlig modificado, utilizado para separar la macrofauna y macroflora del material a compostear.

El filtrador de plancton se fijó a un soporte universal y debajo de él se colocó una caja de petri pequeña con 2 ml de agua estéril tibia, con la finalidad de que amortiguara el choque térmico causado en los microorganismos por el hielo.

Cuando el hielo comienza a derretirse, lo frío del líquido que escurre obligó a los microorganismos a escapar de ese estado extremo de manera que salieron por los poros de la malla y cayeron en la caja Petri cuyo contenido les proporcionó una situación de mayor estabilidad. Al cabo de una hora, se esperaba el filtrado total de la macrofauna y macroflora que se encontraba inicialmente en los 3 gramos de muestra.

Una vez terminada la filtración, se homogeneizó con movimientos lentos el contenido del filtrado agregando al mismo tiempo una gota de rosa de bengala al 1%. Se tomó una alícuota de 0.05 ml de la muestra y se colocó en un portaobjetos para examinarse y realizar el conteo (con la ayuda de papel milimétrico) al microscopio estereoscópico y al microscopio óptico (40x).

## 5. BASES TEORICAS. DEFINICION DE LAS ECUACIONES PARA LOS BALANCES DE CALOR.

En los sistemas de composteo el calor generado por el metabolismo microbiano debe utilizarse eficientemente con el fin de mantener la temperatura del material en el rango óptimo para la biodegradación del material.

Una forma indirecta de poder medir el calor metabólico generado durante las tres primeras etapas de la biodegradación del material a compostear es utilizar la ecuación básica de balance de calor:

$$\begin{aligned} \{ \text{acumulación de calor} \} = \{ \text{entrada de calor} \} - \{ \text{salida de calor} \} + \\ \{ \text{generación de calor} \} - \{ \text{pérdida de calor} \} \end{aligned} \quad (5.1.)$$

La ecuación 5.1. puede simplificarse tomando en cuenta que el calor perdido por el sistema fue igual a cero, ya que las reacciones que se llevan a cabo solamente son exotérmicas. Además no se le añadió calor de forma externa al sistema, por lo que la ecuación se redujo a:

$$\{ \text{acumulación de calor} \} = \{ \text{generación de calor} \} - \{ \text{salida de calor} \} \quad (5.2.)$$

La forma en que se generó calor en el proceso de composteo fue por el metabolismo de los microorganismos presentes en el material. Y la forma en que el calor salió fue por los tres mecanismos de transferencia de calor: conductivo, convectivo y por evaporación del agua. Sustituyendo los términos en la ecuación 5.2. se obtiene:

$$\begin{aligned} \{ \text{acumulación de calor} \} = -\{ \text{calor convectivo} \} - \{ \text{calor conductivo} \} - \\ \{ \text{calor por evaporación} \} + \{ \text{calor metabólico} \} \end{aligned} \quad (5.3.)$$

Cada uno de los términos se calcularon con las siguientes relaciones (la nomenclatura de cada término se detalla en el Anexo 1):

- Acumulación de calor =  $\rho_m C_{Pm} \frac{dT_m}{dt}$  (5.4.)

- Calor convectivo =  $\frac{G_a}{V_{emp}} \cdot \{[\rho_{ae} \cdot h_{ae}] - [\rho_{as} \cdot h_{as}]\}$  (5.5.)

- Calor conductivo =  $A_{Tesp} U (T_m - T_b)$  (5.6.)

El coeficiente global de transferencia de calor (U) depende de las condiciones externas e internas de la pared del reactor por lo que su cálculo incluye ambos términos:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{\delta}{k_r} \quad (5.7.)$$

El coeficiente  $h_o$ , que es el coeficiente de película externo, se calculó con la relación citada por Knudsen (1984) para cuerpos simples sumergidos, con flujo laminar:

$$h_o = \left(\frac{k}{\phi_e}\right) C_r (Re)^m (Pr)^{1/3} \quad (5.8.)$$

Los términos de  $C_r$  y  $m$  depende de la geometría del cuerpo sumergido y del número de Reynolds y Prandtl del medio en que son sumergidos.

De igual forma, la evaluación de  $h_i$ , que se el coeficiente de película interno, se realizó con la ecuación propuesta por Knudsen (1984) para lechos empacados:

$$h_i = 3.6 \frac{k_a}{\phi_m} \left(\frac{\phi_m G}{\mu_a \varepsilon}\right)^{0.365} \quad (5.9.)$$

- Calor por evaporación =  $Q_{BG} \frac{G_a \cdot \rho_a}{V_{emp}} [\gamma_e - \gamma_s]$  (5.10.)

De la ecuación general del balance de calor, se despejó el término del calor metabólico producido:

$$- \text{calor metabólico} = \text{acumulación de calor} + \text{calor convectivo} + \text{calor conductivo} + \text{calor por evaporación} \quad (5.11.)$$

introduciendo los términos anteriores se obtiene:

$$-\Delta H_{\text{met}} = \rho_m C_{p_m} \frac{dT_m}{dt} + \frac{G}{V_{\text{emp}}} \cdot \{[\rho_{\text{ac}} \cdot h_{\text{ac}}] + [\rho_{\text{sa}} \cdot h_{\text{sa}}]\} + A_{\text{Temp}} U (T_m - T_b) + Q_{\text{ng}} \frac{G_a P_a}{V_{\text{emp}}} [\gamma_e - \gamma_s] \quad (5.12.)$$

Puede observarse que todos los términos de la ecuación 5.12. pueden evaluarse con la medición de la temperatura del material y del aire a la entrada y salida del reactor.

**PARTE III.**

**RESULTADOS Y DISCUSION**

## 6. SELECCION DEL MATERIAL.

### 6.1. DETERMINACION DE LA RELACION BAGACILLO/LODOS A UTILIZAR.

El material a utilizar para el proceso de composteo debe cumplir con varias características iniciales para que éste pueda desarrollarse adecuadamente. Una de ellas es que el material tenga una porosidad adecuada (Finstein y col., 1986; Haug, 1979; Gray y Biddlestone, 1974) que permita que el aire difunda por todo el material y evitar anaerobiosis; otra característica importante de la mezcla es que logre degradarse con el fin de estabilizar el material. También es necesario que el material cumpla con los parámetros iniciales de pH, humedad y relación carbono/nitrógeno especificados para que se inicie el composteo (Fitzpatrick, 1993; Zucconi y de Bertoldi, 1986).

En este trabajo se utilizaron lodos activados como material a estabilizar, rico en nitrógeno y microorganismos, y bagacillo de caña de azúcar como agente de volumen y con alta relación carbono/nitrógeno. Para conocer las características de la materia prima utilizada se determinaron algunos parámetros físico-químicos de los materiales usados en la mezcla a compostear. En la Tabla 6.1 se muestran los resultados experimentales obtenidos de las pruebas realizadas.

**TABLA 6.1.** Determinaciones físico-químicas de los lodos activados y el bagacillo de caña.

	Humedad (%)	pH	Carbono (%)	Nitrógeno (%)
Lodos	97.36 ± 0.13	6.13 ± 0.25	36.55 ± 0.66	4.49 ± 0.85
Bagacillo	9.88 ± 0.88	4.21 ± 0.24	47.23 ± 0.44	0.24 ± 0.04

NOTA: Los resultados presentados son el promedio de dos bloques diferentes de muestras analizadas por duplicado

Para determinar en que proporción deben mezclarse los lodos activados y el bagacillo, para obtener las condiciones iniciales especificadas, se realizaron diferentes mezclas que se compostearon en columnas de vidrio de  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , en un baño de agua a  $30^\circ\text{C}$  por un período de 8 días. La cantidad de mezcla utilizada para cada columna fue de 0.1 kg, con una densidad de empaque de  $500 \text{ kg/m}^3$  y la cantidad de aire introducida fue de 0.3 l/min. Se midió constantemente la caída de presión como control de la porosidad de las mezclas. Otros criterios de selección utilizados, medidos al inicio y final del proceso, fueron: porcentaje de disminución del material a compostear, relación C/N, pH y humedad.

Se utilizó sacarosa, urea, difosfato de potasio y una solución de sales (sección 3.1.1.) en la proporción adecuada para balancear el medio en términos de la relación carbono/nitrógeno y para aportar algunos nutrientes necesarios para el metabolismo microbiano. Las proporciones en que

fueron utilizados los materiales con base a 100 g de lodo activados para mantener la relación carbono/nitrógeno igual a 30 se especifican en la Tabla 6.2.

**TABLA 6.2.** Composición en peso de las diferentes mezclas a compostear.

Mezcla	Urea (g)	Sacarosa (g)	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (g)	Solución sales (ml)	Bagacillo (g)	Relación bagacillo/lodo seco
1	0.1	2.2	1.1	11.05	4.3	1.43
2	0.2	3.2	1.6	16.00	6.3	2.10
3	0.3	4.2	2.1	20.95	8.3	2.77
4	0.4	5.2	2.6	25.90	10.3	3.43
5	0.5	6.2	3.1	30.85	12.2	4.07

La cantidad de agua extraída, como se muestra en la Tabla 6.3. fue similar en las cinco mezclas estudiadas, por lo que en el momento del prensado ninguna de ellas presentó diferencia. En cuanto al contenido de humedad obtenido en las mezclas después de prensarlas se observó que la mezcla con relación bagacillo/lodos igual a 2.77 presentó la menor humedad.

**Tabla 6.3.** Condiciones de las distintas mezclas bagacillo/lodos después del prensado.

Relación bagacillo/lodos	Agua extraída (ml)	Humedad prensado (%)	ρ empaque (kg/m <sup>3</sup> )
1.43	63.5	64.16	440
2.10	67.0	59.50	480
2.77	64.5	55.13	510
3.43	68.0	56.65	520
4.07	68.0	69.37	450

En la Tabla 6.4. se muestran los resultados obtenidos de las pruebas fisico-químicas realizadas a las diferentes proporciones de bagacillo/lodos al inicio y final de la fermentación.

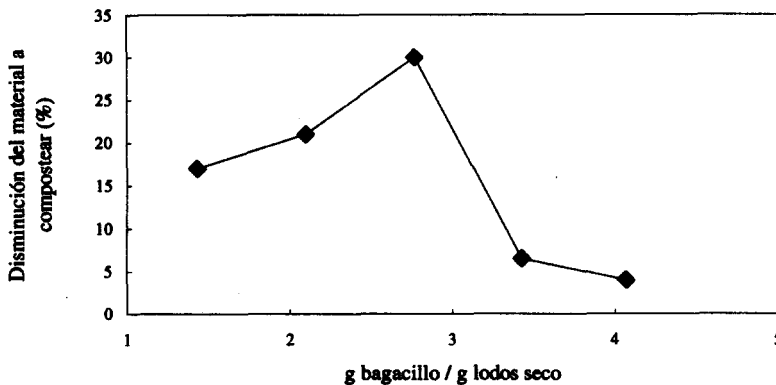
**TABLA 6.4.** Resultados de las pruebas fisico-químicas de las diferentes proporciones bagacillo/lodos.

Relación bagacillo/lodos	H inicial (%)	H final (%)	pH inicial	pH final	C/N inicial	C/N final
1.43	66.75	76.26	6.42	7.59	20.69	20.38
2.10	63.84	77.69	5.90	7.86	21.81	18.57
2.77	64.64	83.60	6.00	7.70	24.95	21.96
3.43	68.24	77.84	6.46	7.41	25.25	22.36
4.07	66.13	76.71	6.50	7.64	33.14	25.03

Como se muestra en la tabla anterior las humedades iniciales del material fueron similares siendo las menores la de la relación 2.10 y 2.77. Al final de los 8 días en que se llevó a cabo la fermentación la humedad aumentó y como puede verse la mayor fue la de la relación 2.77. Esto pudo deberse a que los microorganismos degradaron más la fibra, cambiando así su estructura, lo que permitió que absorbieron mayor cantidad de agua. En cuanto al cambio de pH, todas llegaron a un pH ligeramente alcalino después de la fermentación, que es lo esperado en los procesos de composteo. Se advierte que la diferencia en el contenido de carbono fue menor en la relación de 2.77 y que el contenido de nitrógeno aumentó es los 8 días de composteo debido a que se concentró en el material a causa de la disminución del material a compostear.

La caída de presión al inicio del proceso fue la misma ( $\Delta P = 3 \text{ mm H}_2\text{O}$ ) para todas las mezclas; y a lo largo de los 8 días de proceso no se observó diferencia en el cambio de la caída de presión en las columnas.

En la Figura 6.1. se muestra el porcentaje de disminución del material a compostear luego de los ocho días de fermentación. En la proporción bagacillo/lodos de 2.77 se obtiene un punto máximo en el porcentaje de disminución del material a compostear. Este comportamiento puede deberse a que en este proporción se logró degradar mayor cantidad de bagacillo que en las otras mezclas.



**FIGURA 6.1.** Disminución del material a compostear para las diferentes proporciones bagacillo/lodos.

## 6.2. CONCLUSIONES.

Ya que no existió diferencia en la caída de presión en las distintas mezclas estudiadas a lo largo del proceso, se pudo utilizar cualquier de ellas, asegurando que el aire se difundiría en todo el material a lo largo del proceso.

Con base en los resultados obtenidos de la disminución del material a compostear de cada una de las mezclas, se seleccionó la relación en el rango de 2.0 a 3.0 de bagacillo/lodos. En lo subsecuente se utilizó la relación de bagacillo/lodos de 2.77, pues con ella se aseguró que además de convertir la sacarosa a  $\text{CO}_2$ , se logró degradar en mayor cantidad la fibra presente.

## 7. PROCESOS DE COMPOSTEO

### 7.1. MEDIO DE TEMPERATURA CONTROLADA AGUA: ISOTERMICO.

#### 7.1.1. Condiciones del experimento.

Con este experimento se estudió la evolución de la temperatura del material a compostear bajo condiciones isotérmicas del medio de temperatura controlada, con el fin de cuantificar la magnitud de los gradientes de temperaturas axiales y radiales cuando el medio de temperatura controlada se mantenía a temperatura constante, y determinar de esta forma si la remoción radial o axial (conductiva y convectiva, respectivamente) limita las condiciones de actividad termofílica.

Se introdujeron las columnas y el reactor en un baño de agua a temperatura aproximadamente igual de 30°C durante todo el proceso. La cantidad de material empacado en el reactor fue de 2.8 kg con una densidad de empaque 497 kg/m<sup>3</sup>; para mantener el suministro de aire en 3 vkgm se le agregaron 1.4x10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s. En cada columna se empacó aproximadamente 0.025 kg con una densidad de 510 kg/m<sup>3</sup>, y un flujo de aire de 1.25x10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s.

En la Tabla 7.1. se presentan las condiciones iniciales del material a compostear para el proceso denominado AGI, por el medio de temperatura controlada agua en condiciones isotérmicas.

**TABLA 7.1.** Condiciones iniciales del material a compostear. Experimento AGI.

Humedad	74.54 %
pH	7.45
Carbono	0.50 kg/kg m.s.v.i
Nitrógeno	0.14 kg/kg m.s.v.i
Relación C/N	35

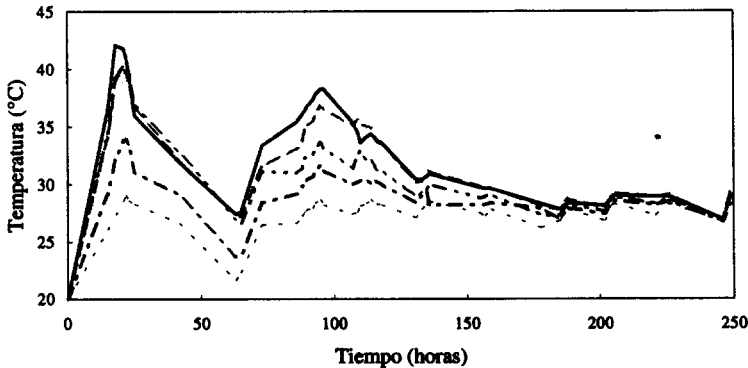
#### 7.1.2. Cinética de temperatura.

En la Figura 7.1 se presenta la cinética de temperaturas del experimento AGI, medida en diferentes puntos del reactor, evaluados en dos diferentes radios y tres diferentes alturas. Los puntos medidos sobre el radio del reactor se denominaron: r = 0, el centro radial y r = 10 el extremo radial. Para las alturas, el punto en la base del reactor se denominó z = 0; el central axial, z = 10, y el de mayor altura, z = 20, todos estos expresados en centímetros.

Como se observa la temperatura del material aumentó rápidamente en las primeras horas del proceso, alcanzando la temperatura mayor de 42°C alrededor de las 25 horas. Después de este tiempo disminuyó y se mantuvo en 35°C la mayor parte del proceso, hasta que a las 150 horas bajó completamente y se mantuvo a 30°C. El descenso de temperatura a las 60 horas se debió a un

corte de energía eléctrica; una vez se restableció el suministro eléctrico se detectó un incremento en la temperatura debido al calor metabólico producido por la actividad microbiana.

La evolución de la temperatura en el reactor durante el proceso coincide con las cinéticas típicas de temperaturas descritas (Crawford, 1983; Gray y Biddlestone, 1974), salvo que las temperaturas alcanzadas en el material no fueron superiores a los 42°C, debido a las pérdidas de calor del sistema.



**FIGURA 7.1.** Cinética de temperatura del experimento AGI para diferentes posiciones:.

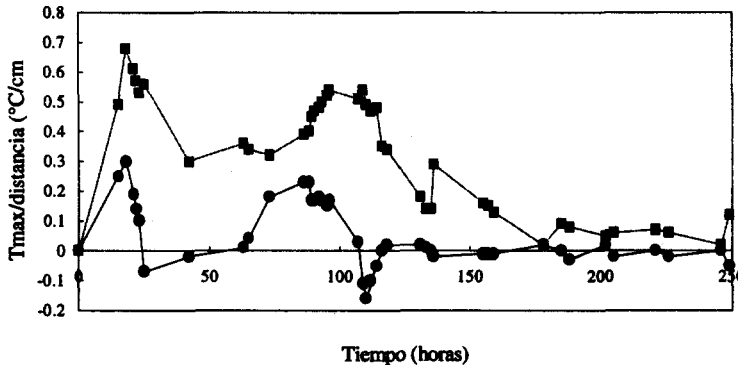
(· · · ·) agua; (— — —)  $r = 10, z = 10$ ; (— · —)  $r = 0, z = 0$ ; (— · —)  $r = 0, z = 10$ ; (—)  $r = 0, z = 20$ .

Es importante notar en la Figura 7.1. que la temperatura radial a una altura de 10 cm, es menor en la periferia del reactor que la del material que se encuentra en el centro. Esto es debido a la pérdida de calor por conducción entre el material y el agua del medio de temperatura controlada, que se encuentra a menor temperatura; a medida que aumentó la altura del material, la temperatura también aumentó; este aumento axial de la temperatura se debe a la diferencia existente en la temperatura del aire de entrada, pues éste entra a la temperatura del baño de agua, que siempre fue menor al del material, y por lo tanto enfría el material en las posiciones más próximas a la base.

En la Figura 7.2. se muestra los gradientes radial y axial expresados como la diferencia de temperatura por unidad de distancia. Comparando la Figura 7.1. con la Figura 7.2 se observa como entre mayor era la temperatura los gradientes aumentaban.

A las 25 horas, cuando se alcanzó la mayor temperatura en el sistema, se observó que se perdieron 0.7°C por cm en dirección radial desde el centro del reactor; a las 100 horas del proceso, por un nuevo incremento de la temperatura se alcanzaron gradientes radiales de hasta 0.5 °C/cm.

En cuanto al gradiente axial, se observa que en el pico de temperatura máxima el gradiente axial fue únicamente de  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ , lo cual indica que existió una mayor pérdida de calor por conducción. En el nuevo aumento de temperatura presentado a las 100 horas, se perdieron axialmente  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ . En cinética del gradiente axial se observa que cambió de signo cerca de las 30 y 110 horas, comparando con la Figura 7.1., se advierte que en esos tiempos, el material empezó a enfriarse, por lo que las temperaturas más cercanas a la base son mayores, pues es la zona que no se encuentra en contacto con el ambiente.



**FIGURA 7.2.** Gradientes de temperatura radial y axial por unidad de distancia del experimento AGI. (■) radial con  $\Delta r = 10$  cm, en  $z = 10$  cm; (●) axial con  $\Delta z = 10$  cm, en  $r = 0$ .

En general, el gradiente radial fue mucho mayor que el axial, lo que muestra que el sistema pierde más calor por la vía conductiva que por la vía convectiva.

### 7.1.3. Cinética de la pérdida del material a compostear.

A lo largo del proceso las diferentes fuentes de carbono se degradan produciendo  $\text{CO}_2$ , reflejado en la pérdida del material a compostear.

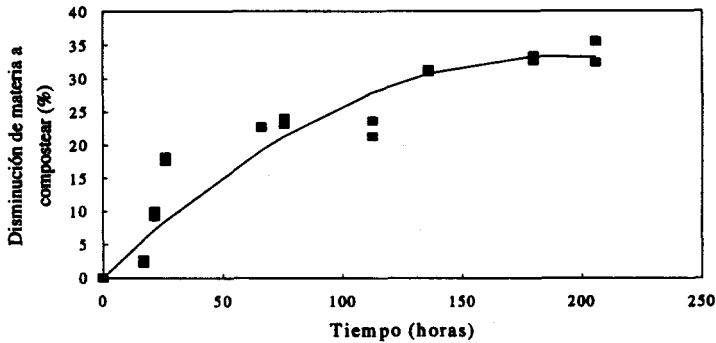
En la Figura 7.3. se muestra la cinética de la pérdida del material a compostear que al cabo de las 220 horas de proceso fue de 33%. En el período en que la temperatura se mantuvo alrededor de los  $40^{\circ}\text{C}$  (entre las 10 y 30 horas) se obtuvo la mayor pérdida del material a compostear, de tal forma que en las primeras 100 horas se perdió el 25% del material orgánico.

De acuerdo a resultados presentados por diversos autores respecto a la pérdida de materia volátil (Iannotti y col., 1993; Marugg y col., 1993; Nakasaki y col., 1990; Nakasaki y col., 1986) la conversión del material durante el proceso termofílico de composteo está comprendida entre 30 y 50%. Aún cuando la temperatura en la corrida AGI no alcanzó los  $60^{\circ}\text{C}$ , se logró obtener una alta degradación del material orgánico.

Marugg y col. (1993) presentan una ecuación de primer grado, que describe la velocidad de desaparición del material a compostear, en donde evalúan la constante de la velocidad de reacción,  $k$ , que depende del sustrato, la población microbiana, la temperatura, la humedad, concentraciones de oxígeno, amoníaco, entre otras; utilizaron pasto y hojas como material a compostear y obtuvieron que el valor de  $k = 0.0073 \text{ h}^{-1}$ . La ecuación utilizada fue:

$$\frac{dm(t)}{dt} = -k ( m(t) - m_e )$$

- con:  $k$  = constante de velocidad de reacción [días<sup>-1</sup>].  
 $m(t)$  = masa en el reactor al tiempo  $t$  (base seca) [kg].  
 $m_e$  = masa en equilibrio, no digerible (base seca) [kg].  
 $t$  = tiempo [días].



**FIGURA 7.3.** Cinética de la pérdida del material a compostear. Experimento AGI.

(■) resultados experimentales; (—) curva ajustada (%P.M.C = 0.352852 \* tiempo - 0.00093 \* tiempo<sup>2</sup>).

Con la suposición de Marrug y col. (1993) que el composteo puede ser descrito con una reacción de primer orden se determinó la constante de velocidad de reacción derivando la curva de la Figura 7.3. y se despejó  $k$  para obtener un función de  $k$  dependiente del tiempo para el sistema utilizado en el experimento AGI, obteniéndose la ecuación:

$$k(t) = \frac{0.352852 - 0.00186 * \text{tiempo}}{0.352852 * \text{tiempo} - 0.00093 * \text{tiempo}^2 - 0.2134}$$

La gráfica de la función de  $k(t)$  se muestra en la Figura 7.4. La constante de la velocidad de reacción fue alta a las 3 horas de iniciado el proceso e igual a  $0.55 \text{ horas}^{-1}$ , y cerca de las 50 horas se volvió casi constante e igual  $0.02 \text{ horas}^{-1}$ . La constante de reacción para el sistema bagacillo/lodos es mayor que la obtenida para el sistema utilizado por Marugg y col. (1993)

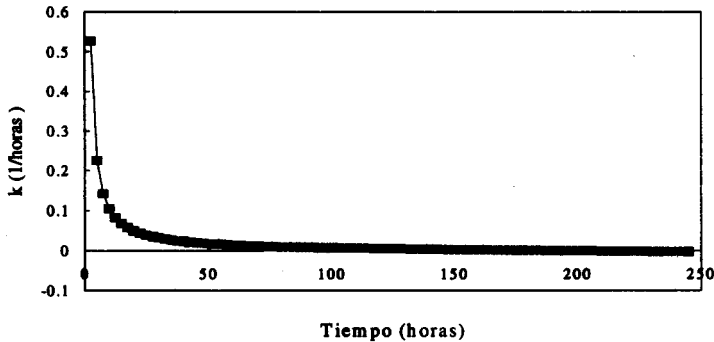


FIGURA 7.4. Constante de la velocidad de reacción del experimento AGI.

#### 7.1.4. Consumo de azúcares solubles.

En la Figura 7.5 se presenta la cinética de los azúcares solubles. Se presentó un descenso rápido en la concentración durante las primeras 48 horas del proceso, en las cuales se consumió el 85% de la sacarosa inicial agregada. La generación de calor metabólico en el sistema está relacionado estrechamente con el consumo de los azúcares por los microorganismos, puede observarse como la desaparición de éstos corresponde al aumento de la temperatura en el material a compostear.

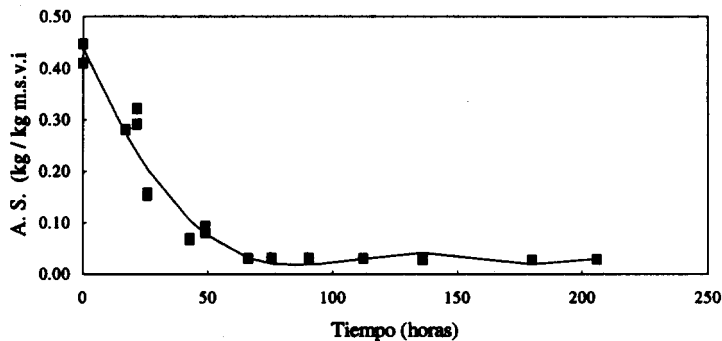
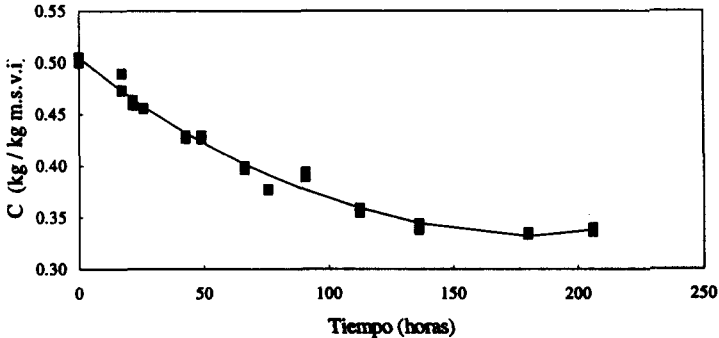


FIGURA 7.5. Cinética de azúcares solubles. Experimento AGI.

### 7.1.5. Cinética de carbono.

El consumo de carbono a lo largo del proceso, también es una medida del grado de degradación que se dio. En la Figura 7.6. se muestra la cinética del consumo de carbono del material a compostear para el experimento AGI.



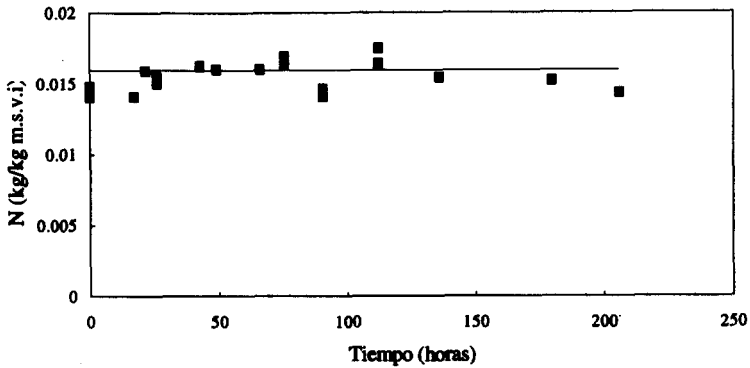
**FIGURA 7.6.** Cinética de carbono del experimento AGI.

La pérdida de carbono fue mayor en las primeras 50 horas del proceso (quedando un 80% del carbono inicial agregado), luego la velocidad de consumo de carbono disminuyó en el resto del experimento. Hammouda y Adams (1986) encontraron también una pérdida mayor del carbono original en los primeros días del proceso y luego una disminución en la velocidad de desaparición de éste, atribuyendo a ésta pérdida, la descomposición de otros productos químicos más resistentes, tales como la celulosa y lignina que son los principales componentes del bagacillo.

La pérdida de carbono total en el proceso fue de 34%, este valor correspondió al obtenido en el porcentaje de la pérdida del material a compostear, lo que nos indica que el material perdido en el proceso fue principalmente carbono, que se descompuso formando  $CO_2$ .

### 7.1.6. Cinética de nitrógeno

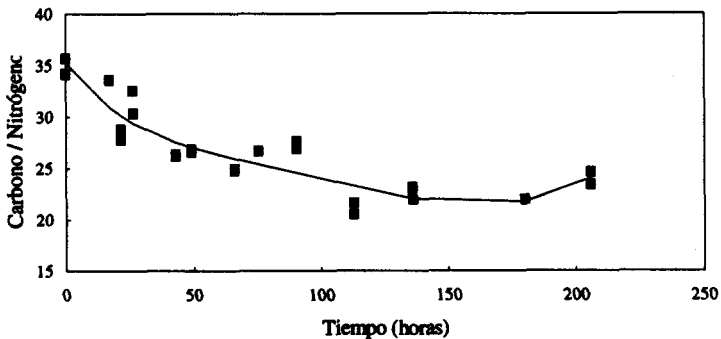
En la Figura 7.7. se presenta la cinética del contenido de nitrógeno para el experimento AGI. El contenido de nitrógeno durante el experimento se mantuvo constante. Ya que la producción de amoníaco está ligada con altas temperaturas y pH básico (Bonazzi y col., 1990), y en el experimento AGI no se alcanzaron temperaturas mayores a los  $42^{\circ}C$ , los resultados del contenido de nitrógeno indicaron que no existió pérdidas de él en forma de amoníaco.



**FIGURA 7.7.** Cinética de nitrógeno, experimento AGI.

**7.1.7. Cinética de la relación carbono/nitrógeno.**

El cambio en la relación C/N durante el proceso es otro parámetro que permite determinar la evolución del proceso. Ya que en el experimento AGI la relación C/N inicial fue aproximadamente igual a 30, se esperaba que ésta disminuyera a valores cercanos a 20 en el experimento. Se presenta en la Figura 7.8. la cinética de la relación C/N.



**FIGURA 7.8.** Cinética de la relación carbono/nitrógeno. Experimento AGI.

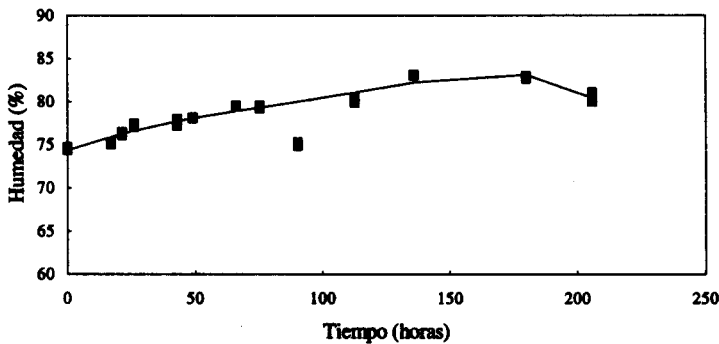
La relación carbono/nitrógeno al final de las 200 horas del proceso disminuyó hasta 22. Es interesante observar como la disminución mayor se dio en las primeras 50 horas del proceso.

Posterior a este período, la relación C/N fue descendiendo a menor velocidad, ya que el consumo de carbono fue más lento al final del proceso.

De acuerdo a Chanyasak y Kubota (1981), un valor de 20 en la relación C/N es deseable para el producto de composteo. Así, que el valor final de 22 obtenido en el experimento fue un buen indicio de la degradación del material a compostear utilizado.

**7.1.8. Cinética de humedad.**

En la Figura 7.9. se presenta el cambio en el contenido de agua del material a compostear para el experimento AGI. La humedad inicial del material fue de 74%, y a medida que el proceso transcurrió ésta aumento hasta 82%. Este alto contenido de agua en el material a compostear reflejó la tendencia del bagacillo a absorber y retener agua a medida que se degradó la fibra.



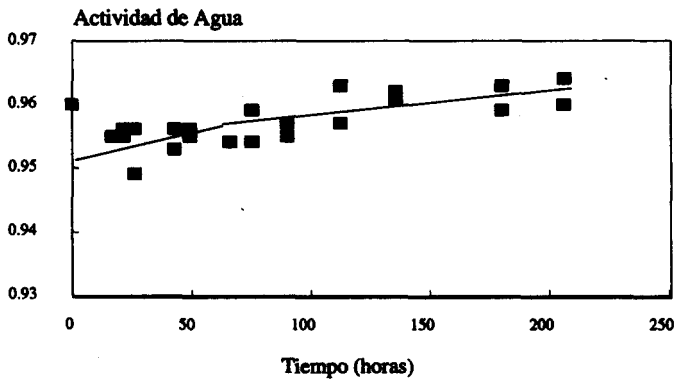
**FIGURA 7.9.** Cinética de humedad del experimento AGI.

Suler y Finstein (1977), han determinado que humedades mayores al 70% no son recomendables para el proceso de composteo, ya que inhiben el crecimiento de los microorganismos aerobios debido a que el material se compacta y se dificulta la dispersión del oxígeno; pero los resultados del experimento AGI muestran que el bagacillo utilizado como agente de volumen es capaz de absorber una gran cantidad de agua, y esto se reflejó en la degradación del material, pues al final del proceso se obtuvo un 33% de pérdida del material a compostear.

**7.1.9. Cinética de actividad de agua.**

En fermentación sólida se presentan bajas actividades de agua, por lo que es necesario conocer este valor a lo largo del proceso y determinar la habilidad de los microorganismos para

desarrollarse. En la Figura 7.10. se presenta la cinética de actividad de agua del experimento AGI. La  $A_w$  inicial fue de 0.96, manteniéndose en el rango de 0.955 a 0.965 a lo largo del proceso. Estos valores aunque están cerca del crítico (0.93 (Rose, 1977)) para el crecimiento de los microorganismos, permitieron que se desarrollaron en el material y lo degradaran. Además se observó que la  $A_w$  aumentó en el transcurso del proceso debido a que la humedad también aumentó y además se consumió por completo la sacarosa, que es un soluto que hace que la  $A_w$  disminuya.



**FIGURA 7.10.** Cinética de actividad de agua. Experimento AGI.

### 7.1.10. Cinética de pH.

En la Figura 7.11. se muestra la cinética de pH de la corrida AGI. El comportamiento del pH en el proceso AGI corresponde al típico presentado por las compostas a nivel industrial (Finstein y col., 1986; Gray y Biddlestone, 1974). Como se observa, el pH disminuye al inicio del proceso a valores cercanos a 6.0. Después de las 50 horas, este tiende a aumentar, hasta alcanzar valores ligeramente alcalinos (8.0) el resto del proceso. La disminución del pH en las primeras horas del proceso se debió a la formación de ácidos orgánicos a partir de la descomposición de la sacarosa, lo que favoreció el crecimiento de algunos hongos; posteriormente el aumento del pH se debió a la formación de amoníaco a partir de las moléculas de aminoácidos y proteínas (Zucconi y de Bertoldi, 1986; Atchley y Clark, 1979).

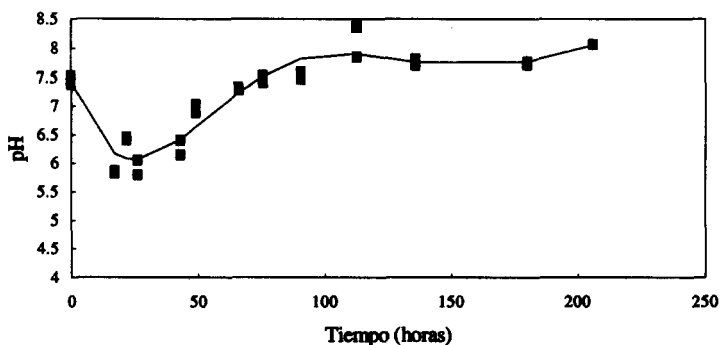


FIGURA 7.11. Cinética de pH. Experimento AGI.

## 7.2. MEDIO DE TEMPERATURA CONTROLADA AGUA: NO ISOTERMICO.

### 7.2.1. Condiciones del experimento.

Debido a que no se alcanzaron temperaturas mayores a los 42°C fue necesario implementar un sistema de control de temperatura que permitió que los gradientes de temperatura entre el medio de temperatura controlada y el material a compostear disminuyera.

El proceso de composteo se llevó a cabo bajo condiciones controladas de temperatura del medio aislante, evitando pérdidas de calor por conducción y convección, de tal forma que los gradientes de temperatura se minimizaran, utilizándose para ésto el control diferencial de temperatura (CDT).

Las columnas y el reactor fueron introducidos en un baño de agua con temperatura variable, que dependió de la temperatura del material a compostear. La cantidad de material que se empacó en el reactor fue de 2.95 kg, con densidad de empaque de 524 kg/m<sup>3</sup>, la cantidad de aire necesaria se fijó en 3 vkgm, suministrándole 1.5x10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s. Las columnas fueron empacadas a 510 kg/m<sup>3</sup>, y el flujo de aire fue de 1.25x10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s.

Se presentan en la Tabla 7.2. las condiciones iniciales del material a compostear para el experimento con medio de temperatura controlada agua en condiciones no isotérmicas (AGNI):

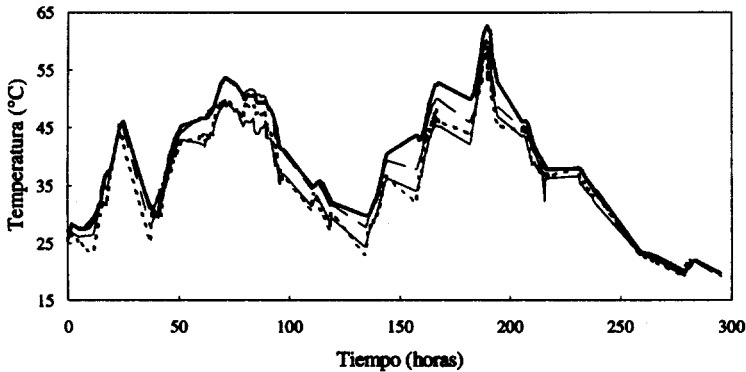
### 7.2.2. Cinética de temperatura.

En la Figura 7.12. se presenta la gráfica de la evolución de la temperatura en el experimento AGNI. Se muestra la temperatura del agua, la temperatura de control que correspondió al r = 0 y z = 10, y la de las posiciones: r = 10, z = 10, y r = 0 y z = 20.

**TABLA 7.2..** Condiciones iniciales del material a compostear. Experimento AGNI.

Humedad	70.38 %
pH	8.0
Carbono	0.51 kg/kg m.s.v.i
Nitrógeno	0.017 kg/kg m.s.v.i
Relación C/N	29.7

La máxima temperatura alcanzada por el material a compostear fue de 63°C; y el rango termófilo de 50 - 60 °C se mantuvo alrededor de 80 horas (entre las 160 y 220 horas de proceso). Es importante notar la diferencia de temperatura existente entre el medio de temperatura controlada (agua) y el material dentro del reactor, la cual se fijó en 2°C, lo que permitió que la temperatura aumentara más de 60°C.



**FIGURA 7.12.** Cinética de temperatura del experimento AGNI para diferentes posiciones:

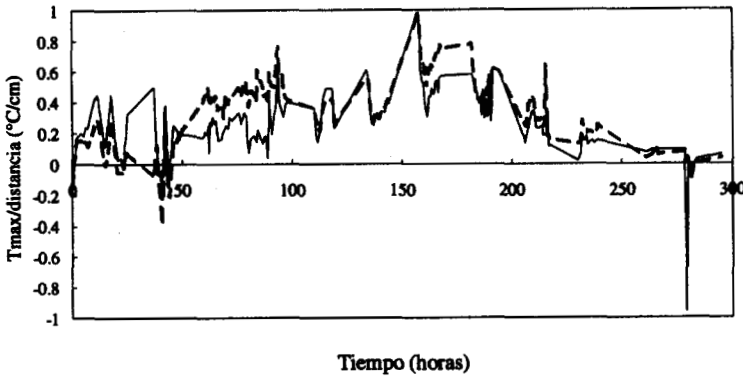
(· · ·) agua; (—)  $r = 0, z = 10$ ; (— · —)  $r = 10, z = 10$ ; (— —)  $r = 0, z = 20$ .

El descenso de la temperatura a las 40 horas se debió a una fuga de agua en el sistema, una vez reparada se conectó nuevamente el sistema y como puede observarse la temperatura aumentó nuevamente debido al metabolismo microbiano. Después de 100 horas de proceso la temperatura disminuyó gradualmente hasta alcanzar 25°C y a las 140 horas empezó a aumentar nuevamente alcanzado a las 200 horas el pico máximo de temperatura. Este nuevo aumento de la temperatura pudo deberse a la sucesión de los diferentes microorganismos presente en el material.

Otros autores (Magalhães y col., 1993; Nakasaki y col. 1992; Ashbolt y Line, 1985) han obtenido cinéticas temperatura utilizando para ello sistemas variados, desde el reactor y el control de ésta en el sistema, hasta las diversas mezclas que compostean. Todos coinciden en mantener

una temperatura fija de control (que se encuentra entre 55°C y 60°C) para el medio de temperatura controlada y el material a compostear. El material alcanza rápidamente (aproximadamente 2 días) la temperatura control y ya que la temperatura del medio de temperatura controlada no disminuye, logran mantener la etapa termofílica entre 10 y 20 días. El corto período en que se mantuvo la temperatura entre 50-60 °C para el experimento AGNI se debió a la estrategia de control de temperatura que se empleó, la cual se basó en la auto-evolución de la temperatura del material sin modificar con factores externos su comportamiento, lo que permitió una descripción detallada de la relación entre las variables del proceso.

En la Figura 7.13. se presentan los gradientes radial y axial por unidad de distancia. El gradiente radial, se obtuvo restando la temperatura del  $r = 0$  y la de  $r = 10$ . en  $z = 10$ . Se presenta el gradiente axial en  $r = 0$ , que se obtuvo de la diferencia entre  $z = 10$  y  $z = 0$ .

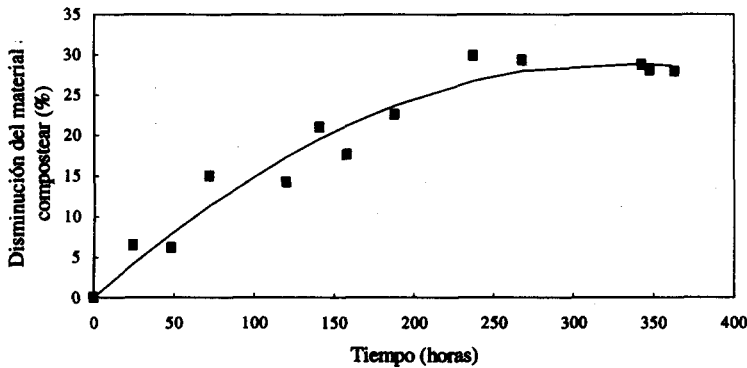


**FIGURA 7.13.** Gradientes de temperatura axiales y radiales por unidad de distancia del experimento AGNI. (—) radial  $T|_{r=0} - T|_{r=10}$  en  $z = 10$ ; (—) axial  $T|_{z=10} - T|_{z=20}$  en  $r = 0$ .

Puede verse que el gradiente radial fue mayor al axial solamente en los períodos de temperaturas máximas. El gradiente radial fue similar al gradiente axial por lo que la remoción de calor por vía conductiva fue parecida a la convectiva. A las 150 horas se presenta el mayor gradiente, tanto radial como axial, debido a que fue en este período en que el material vuelve a calentarse, confirmando esto, que se produjo una gran cantidad de calor metabólico debido al crecimiento de microorganismos.

**7.2.3. Cinética de la pérdida del material a compostear.**

En la Figura 7.14. se muestra la cinética de la pérdida del material a compostear. Se obtuvo una pérdida total del material a compostear del 30% después de 350 horas de proceso. Comparando la degradación del material volátil con la cinética de temperatura (Figura 7.12.) se nota como a las 180 horas, en que la temperatura se elevó arriba de los 45°C, se volatilizó un 20% de material orgánico; Viel y col. (1986) determinaron también una mayor conversión de la materia orgánica de la materia orgánica en las primeras fases del proceso que durante la fase de maduración.



**FIGURA 7.14.** Pérdida del material a compostear para el experimento AGNI.

(■) resultados experimentales; (—) curva ajustada (%P.M.C = 0.176811 \* tiempo - 0.00027 \* tiempo<sup>2</sup>).

También fue calculada la constante de velocidad de reacción para el sistema en que el baño de agua no se mantuvo constante. En la Figura 7.15. se presenta la gráfica de k como función del tiempo. La ecuación utilizada fue:

$$k(t) = \frac{0.176811 - 0.00054 * \text{tiempo}}{0.176811 * \text{tiempo} - 0.00027 * \text{tiempo}^2 - 0.17015}$$

La velocidad de reacción fue a las 3 horas del inicio del proceso aproximadamente 0.68 horas<sup>-1</sup>, y luego de las 50 horas se mantuvo constante e igual a 0.02 horas<sup>-1</sup>.

**7.2.4. Consumo de azúcares solubles.**

El consumo de los azúcares solubles durante el proceso AGNI se muestra en la Figura 7.16. El consumo de los azúcares solubles concuerda con la etapa termoflica del proceso existiendo una rápida desaparición de los azúcares solubles en las primeras 75 horas del proceso,

en las que se consumió el 83% de la sacarosa agregada, observándose el consumo completo de ellas luego de las 150 horas.

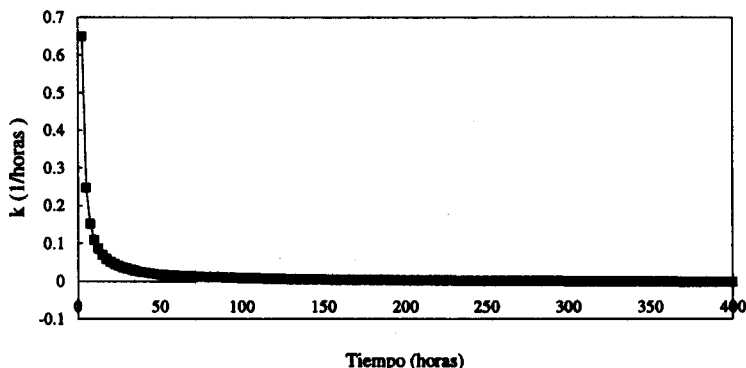


FIGURA 7.15. Constante de la velocidad de reacción del experimento AGNI.

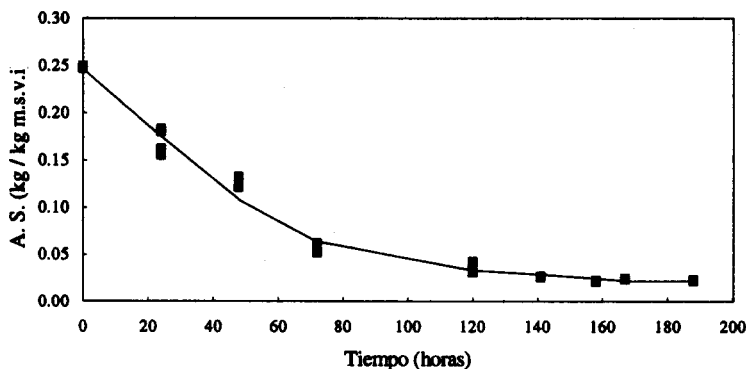


FIGURA 7.16. Cinética del consumo de azúcares solubles. Experimento AGNI.

### 7.2.5. Cinética de carbono.

El contenido de carbono a lo largo del proceso AGNI se presenta en la Figura 7.17. Luego de las 350 h de proceso, se observa como se perdió un 29% del carbono inicial del material a compostear. Se nota además como en las primeras 150 h de composteo, se consumió el 20% del carbono original que coincide con el consumo de sacarosa. Si se compara este resultado con la cinética de temperatura presentada en la Figura 7.12, se observa que después de las 150 horas el

proceso se mantuvo por un período de 24 horas arriba de los 45°C, favoreciendo este aumento de temperatura la degradación del material orgánico. La velocidad de desaparición del carbono disminuyó después de éste tiempo debido a que se degradó la hemicelulosa y celulosa del bagacillo (Hammouda y Adams, 1986).

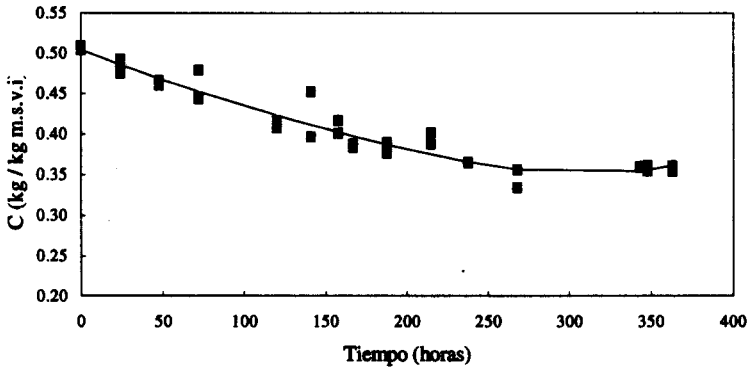


FIGURA 7.17. Cinética de carbono, experimento AGNI

### 7.2.6. Cinética de nitrógeno.

La cinética del contenido de nitrógeno para el proceso AGNI se muestra en la Figura 7.18. Como se advierte el contenido de nitrógeno se mantiene prácticamente constante durante las primeras 50 horas del proceso y luego de este tiempo disminuye, hasta tener al final de las 350 horas de proceso un 29% de pérdida del nitrógeno inicial agregado. Ya que la única forma de perder nitrógeno es que evolucione amoníaco cuando el pH fuese ligeramente básico (Nakasaki y col., 1992; Bonazzi y col., 1990, Nakasaki y col., 1990; Sikora y col., 1983) se esperaba que la pérdida de nitrógeno que se obtuvo en el experimento AGNI se debiera a la producción de amoníaco. Entre las 100 y 200 horas el proceso se encuentra en la etapa termofílica, condiciones favorables para la producción de amoníaco (Bonazzi y col., 1990).

Hammouda y Adams (1986), encontraron una pérdida de nitrógeno del 50% a lo largo de todo el proceso (180 días); procediendo dicha pérdida en los primeros 15 días; Marugg y col. (1993), determinaron que las pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco se producen en los primeros 5 días del proceso. En la Figura 7.18. se observa que después de las 200 horas, ya no hay cambio en el contenido de nitrógeno, por lo que se esperaría que se mantuviese constante en el período de maduración del mismo.

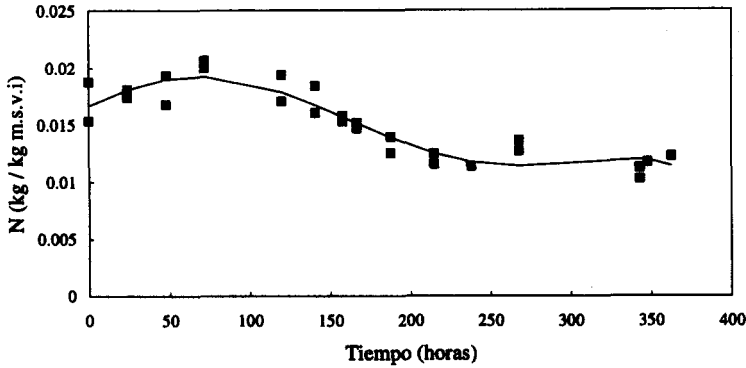


FIGURA 7.18. Cinética de nitrógeno, experimento AGNI.

**7.2.7. Producción de amoníaco.**

En esta corrida se capturó amoníaco proveniente de la fase gaseosa a la salida del reactor. La cinética de la cantidad de nitrógeno perdido en la fase gaseosa capturado en forma de amoníaco se muestran en la Figura 7.19.

Se muestra como a las 150 horas del proceso se empezó a perder nitrógeno en forma de amoníaco en la corriente gaseosa. Este tiempo concuerda con la pérdida de nitrógeno medido en la fase sólida, las altas temperaturas alcanzadas por el material y además el aumento del pH a valores alcalinos.

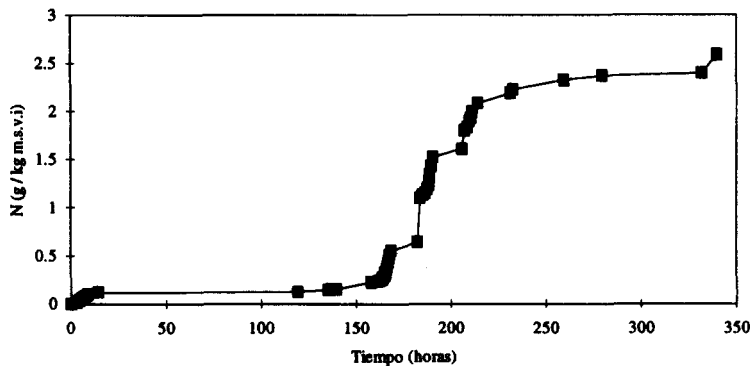
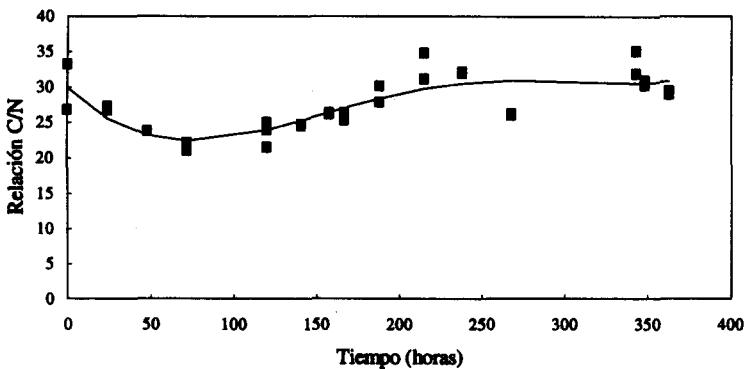


FIGURA 7.19. Cinética de pérdida de nitrógeno en la fase gaseosa, corrida AGNI.

Se observa además como la máxima evolución de amoníaco se llevó a cabo entre las 200 y 250 horas en las que se observó la mayor pérdida de nitrógeno medido en la fase sólida.

**7.2.8. Cinética de la relación carbono/nitrógeno.**

En la Figura 7.20. se presenta la cinética de la relación carbono/nitrógeno para el experimento AGNI. En las primeras 100 horas del proceso existió una tendencia de la relación carbono/nitrógeno a descender hasta un valor cercano a 22. Luego de este tiempo se observa un incremento en la relación carbono/nitrógeno del material, hasta que luego de las 225 horas se mantiene constante con un valor igual a 30. Este nuevo aumento en la relación carbono/nitrógeno es debido a la pérdida de nitrógeno observada, ya que el contenido de carbono después de éste período se mantuvo constante.



**FIGURA 7.20.** Cinética de la relación carbono/nitrógeno. Experimento AGNI.

La relación carbono/nitrógeno del material sólido a compostear, entonces, no es una medida directa del grado de degradabilidad ni madurez del sistema, pues los valores que se obtuvieron en la corrida AGNI, no muestran la conversión del 30% que se obtuvo del carbono total. A esta misma conclusión llegaron Schumann y col. (1993), Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992) y Chayasak y Kubota (1981), que sugieren utilizar como parámetro de estabilidad y madurez de la composta la relación carbono/nitrógeno obtenida del extracto soluble de la composta.

### 7.2.9. Cinética de humedad.

En la Figura 7.21. se muestra el cambio en el contenido de humedad del material a compostear. Existió una tendencia de aumento de la humedad en el material a compostear, desde 70% hasta 87%, después de 350 horas de composteo. Se recomienda un rango óptimo de humedad de 55 a 60% (Fitzpatrick, 1993; Pereira-Neto y col., 1986; Crawford, 1983), los resultados del experimento AGNI muestran que aún cuando el proceso se llevó a cabo durante 14 días y con valores de humedades arriba del 85%, la conversión que se alcanzó (30%) estuvo en el rango esperado. Esta humedad tan alta del material y la buena conversión obtenida se debe al agente de volumen utilizado, pues el bagacillo de caña de azúcar es capaz de absorber hasta el 85% de agua (ICIDCA, 1990).

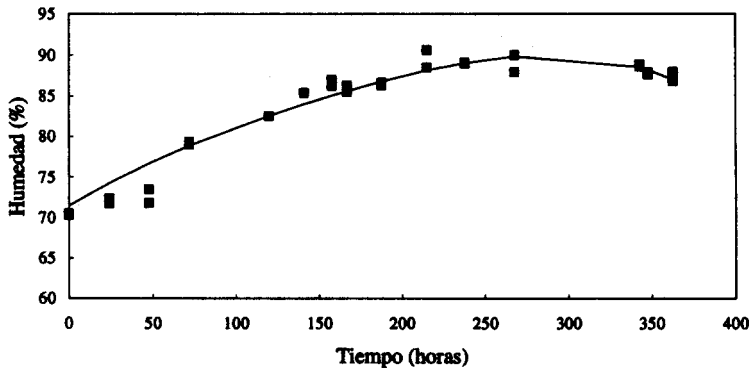


FIGURA 7.21. Cinética de humedad del experimento AGNI.

### 7.2.10. Cinética de pH.

La cinética del pH del experimento AGNI se presenta en la Figura 7.22. Puede observarse como la curva de pH obtenida para este experimento es la típica presentada en todos los procesos de composteo (Viel y col., 1986). El pH empezó a decrecer hasta llegar a las 100 horas a un valor de 4.5, que concuerda con el tiempo en que fue consumida la sacarosa, formando así ácidos orgánicos. Después de que la sacarosa se consumió por completo el pH empezó a aumentar, alcanzado a las 250 horas un valor ligeramente alcalino. Puede observarse también que este tiempo concuerda con la pérdida de nitrógeno obtenida, por lo que el pH también es un factor importante para la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco.

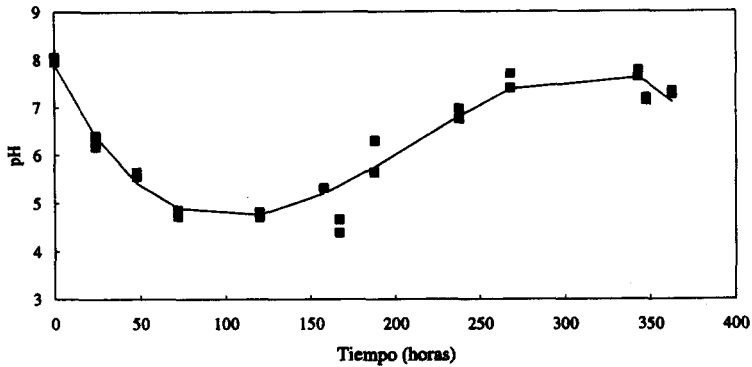


FIGURA 7.22. Cinética de pH. Experimento AGNI.

### 7.3. MEDIO DE TEMPERATURA CONTROLADA AIRE: NO ISOTERMICO

#### 7.3.1. Condiciones del experimento.

Debido a la facilidad del manejo de los sistemas en que se utiliza el aire como medio de temperatura controlada, este experimento se llevó a cabo en condiciones no isotérmicas del aire, denominándose la corrida como AINI. Para obtener las condiciones no isotérmicas se utilizó el CDT y se fijó la temperatura del medio de temperatura controlada 5°C.

En este experimento se utilizó la fracción del bagacillo de caña que pasó la malla 4. En la Tabla 7.3. se presenta la distribución del tamaño de partícula del bagacillo de caña utilizado.

TABLA 7.3. Distribución del tamaño de partícula del bagacillo de caña.

Intervalo de tamiz (malla Tyler)	Diámetro promedio de partícula (mm)	Fracción masa retenida en peso (%)
+4	> 4.75	10.51
-4 +8	4.75	12.49
-8 +20	2.36	30.27
-20 +35	0.80	25.42
-35	0.50	21.31

Es importante observar que para este experimento se dificultó la extracción del agua de la mezcla de bagacillo/lodos por medio del prensado, por lo que no se eliminó la misma cantidad de agua que en los experimentos anteriores y esto se reflejó en la humedad inicial de la mezcla.

El material empacado en el reactor fue de 3.1 kg, con densidad de empaque de 550 kg/m<sup>3</sup>, suministrándole aire a razón de 3 vgkm. es decir 1.5x10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s. Las columnas fueron empacadas a 510 kg/m<sup>3</sup>, y un gasto de aire de 1.25x10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s.

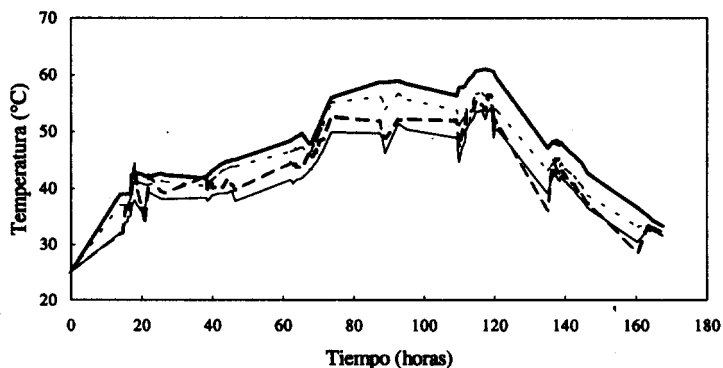
Las condiciones iniciales de la mezcla a compostear se presentan en la Tabla 7.4.

**TABLA 7.4.** Condiciones iniciales del material a compostear. Experimento AINI.

Humedad	78 %
pH	8.4
Carbono	0.5 kg/kg m.s.v.i
Nitrógeno	0.02 kg/kg m.s.v.i
Relación C/N	26

### 7.3.2. Cinética de temperatura.

En la Figura 7.23. se muestra la cinética de la temperatura del material a compostear para el experimento AINI. Se presentan las temperaturas medidas en la posición r = 0, z = 10, tomada como temperatura de control; la de la posición r = 10, z = 10; y la de la posición r = 10, z = 20. También se graficó la temperatura del aire (medio de temperatura controlada).



**FIGURA 7.23.** Cinética de temperatura, experimento AINI.

(—) r = 0, z=10; (· · ·) r = 10, z = 10; (— —) r = 0, z = 20; (— · —) aire.

Para este experimento se alcanzó una temperatura máxima de 61°C a las 120 horas del proceso y se mantuvo en el rango termofílico alrededor de 100 horas. Es importante resaltar como los gradientes de temperatura fueron mayores en este experimento que en el AGNI, debido a la diferencia en la estrategia de control de la temperatura. Se observa además como la temperatura del extremo del reactor a una altura de 10 cm estuvo más cerca a la temperatura de control que a la temperatura del aire, por lo tanto, este sistema mantiene también en condiciones homogéneas de temperatura al material.

En la Figura 7.24. se presenta el gradiente radial de temperatura por unidad de distancia, que se midió a la altura de 10 cm, restando la temperatura de  $r = 0$  a la de  $r = 10$ . El gradiente radial fue 0.2 °C/cm en las primeras 80 horas del proceso, período en el cual la temperatura del material comenzaba a elevarse; a las 120 horas el gradiente aumentó hasta 0.7 °C/cm cuando se obtuvo el pico de temperatura, concordando este gradiente con los de los experimentos AGI y AGNI, que en la máxima temperatura el gradiente fue igual a 0.7°C/cm.

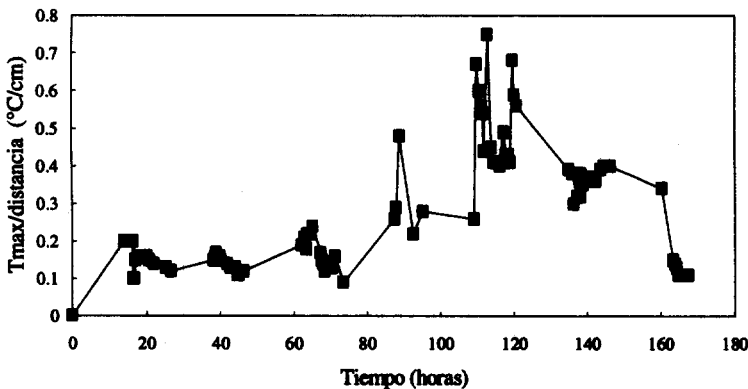
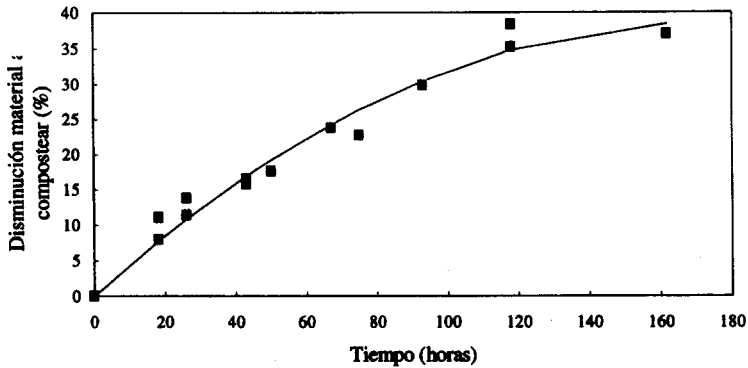


FIGURA 7.24. Cinética gradiente radial  $T|_{r=0} - T|_{r=10}$  en  $z = 10$ . Experimento AINI.

### 7.3.3. Cinética de pérdida del material a compostear.

En la Figura 7.25. se presenta la cinética de pérdida del material a compostear. Al final del proceso se obtuvo una pérdida del 37% de la materia volátil. De igual forma que para los experimentos anteriores, la máxima pérdida transcurrió en la etapa termofílica del proceso (18%), lo que refleja que la temperatura es un factor determinante para aumentar la velocidad de degradación del material orgánico.



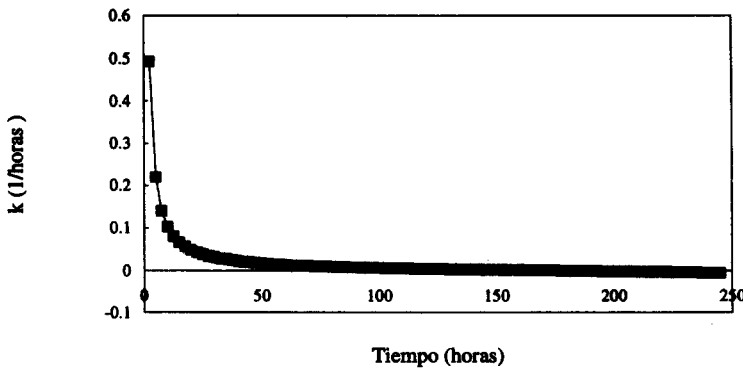
**FIGURA 7.25.** Cinética de la pérdida del material a compostear, experimento AINI.

(■) resultados experimentales. (—) curva ajustada (%P.M.C. =  $0.449338 * \text{tiempo} - 0.00131 * \text{tiempo}^2$ ).

Se muestra en la Figura 7.26. la gráfica de la constante de velocidad de reacción para el sistema AINI, calculada con la ecuación:

$$k(t) = \frac{0.449338 - 0.0026 * \text{tiempo}}{0.449338 * \text{tiempo} - 0.00131 * \text{tiempo}^2 - 0.2159}$$

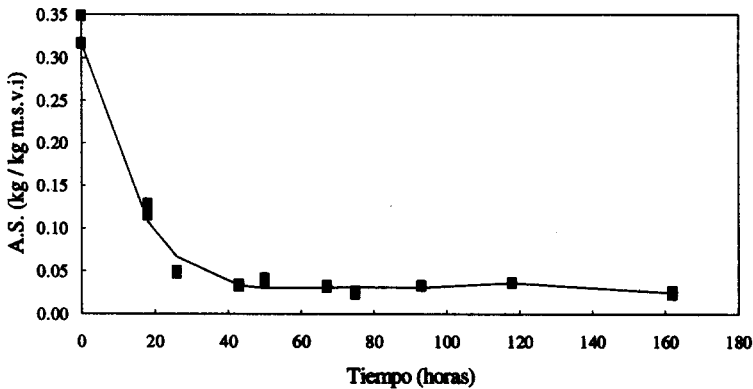
Al inicio del proceso (3 horas) fue de  $0.5 \text{ horas}^{-1}$ , y luego de las 50 horas se mantuvo constante e igual a  $0.018 \text{ horas}^{-1}$ . Para los tres experimentos se observa que los valores fueron semejantes, por lo que se deduce que fue un valor propio del sistema bagacillo/lodos utilizado en estos experimentos.



**FIGURA 7.26.** Constante de la velocidad de reacción del experimento AINI.

### 7.3.4. Cinética de azúcares solubles.

En la Figura 7.27. se presenta la cinética del consumo de los azúcares solubles del material a compostear en la corrida AINI.



**FIGURA 7.27.** Cinética de azúcares solubles, experimento AINI.

Puede apreciarse que el consumo de la sacarosa en este experimento fue mucho más rápido que en las corridas AGI y AGNI, pues aquí a las 24 horas ya se habían consumido el 88% del azúcar inicial. Este consumo acelerado de la sacarosa concuerda además con los resultados obtenidos en la pérdida del material a compostear, ya que a las 24 horas se había perdido el 11% del material a compostear.

### 7.3.5. Cinética de carbono.

La disminución en el contenido de carbono del experimento AINI se presenta en la Figura 7.28. Al final del experimento se obtuvo una pérdida de carbono total del 36.5% que coincide con la pérdida del materia a compostear (37%). Puede observarse nuevamente como la pérdida mayor de carbono se dio en las primeras horas del proceso (etapa termofílica).

Al inicio del proceso, la cantidad de carbono dado por la sacarosa fue de 0.038 kg C/kg m.s.v.i. Luego de las 24 horas de composteo, se consumieron 0.035 kg C/kg m.s.v.i, coincidiendo con la pérdida de azúcares solubles en el proceso. Y debido a que después de éste período se consume la fuente de carbono de difícil degradación, la velocidad de consumo de carbono disminuye el resto del proceso.

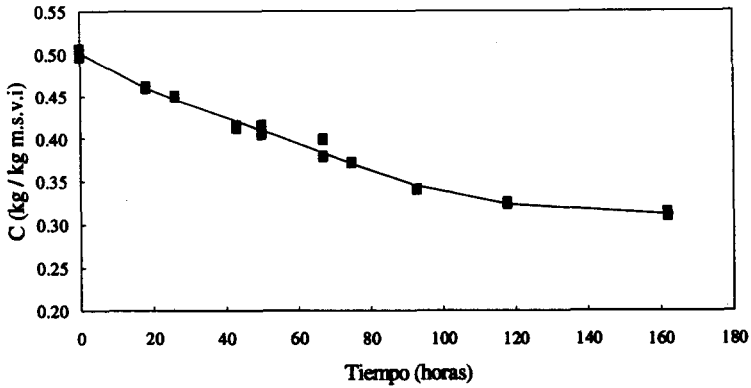


FIGURA 7.28. Cinética del consumo de carbono. Experimento AINI.

### 7.3.6. Cinética de nitrógeno.

En la Figura 7.29. se presenta la cinética de nitrógeno del experimento AINI. Al igual que en el experimento AGNI, el nitrógeno se mantuvo constante durante las primeras 50 horas de proceso, y luego de este período disminuyó de forma significativa. Nuevamente la disminución del nitrógeno concordó con la etapa termofílica del proceso.

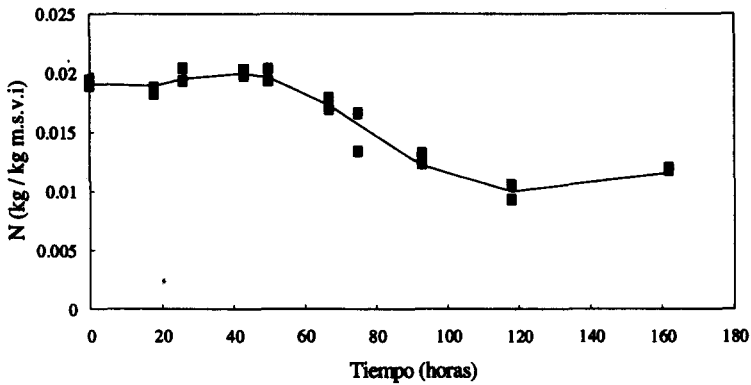


FIGURA 7.29. Cinética de nitrógeno, experimento AINI.

### 7.3.7. Producción de amoníaco.

En esta corrida también se capturó amoníaco de la fase gaseosa a la salida del reactor. La cinética de la cantidad de nitrógeno perdido en el transcurso del proceso a la salida del reactor se muestran en la Figura 7.30.

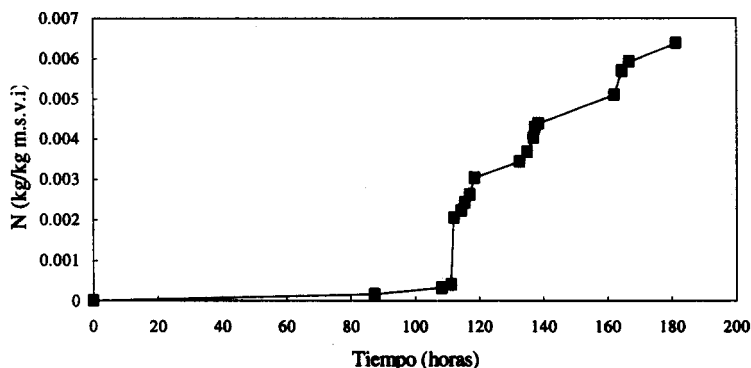


FIGURA 7.30. Cinética de pérdida de nitrógeno en la fase gaseosa, experimento AINI.

El amoníaco empezó a evolucionar, después de las 90 horas de composteo, momento en el cual el pH empezó a aumentar a valores alcalinos y la temperatura fue mayor a los 55°C. Estos resultados confirman los del experimento anterior, que el nitrógeno empieza a perderse en la corriente de salida debido a la interacción existente entre el pH y las temperaturas elevadas.

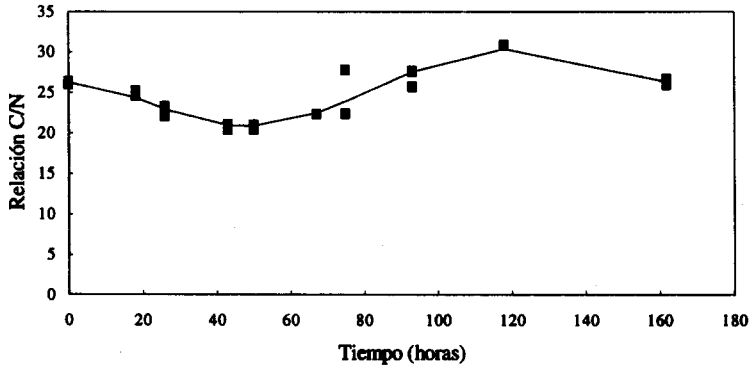
### 7.3.8. Cinética de la relación carbono/nitrógeno.

La cinética de la relación carbono/nitrógeno se presenta en la Figura 7.31. Se observa como la relación C/N disminuye en la primera etapa del proceso, y luego vuelve a aumentar, esto se debió a la pérdida de nitrógeno observada después de las 60 horas del proceso.

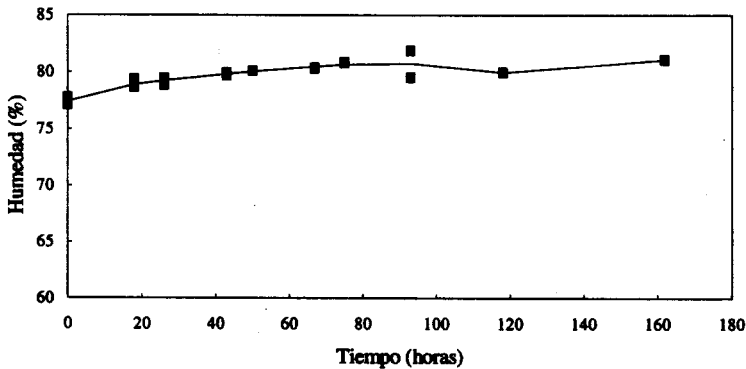
### 7.3.9. Cinética de humedad.

Puede observarse en la Figura 7.32. como la materia inicial a compostear tuvo una humedad inicial elevada, y esto se debió a que no se pudo extraer más agua en el prensado a la mezcla de bagacillo/lodos inicial. También se observó un aumento en el contenido de agua en el material, pero no fue tan elevado como en los dos experimentos anteriores, pues en esta corrida se llegó a una humedad final cercana al 82%, debido a que la temperatura del aire de entrada era 5°C

menor que la del material, perdiéndose agua por evaporación y por lo tanto se observó un mayor secado en el material.



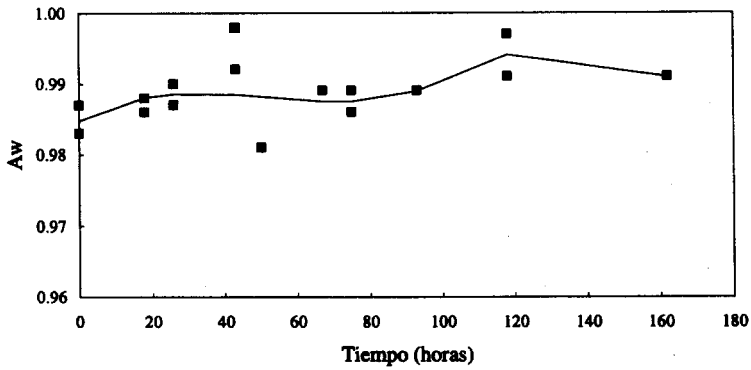
**FIGURA 7.31.** Cinética de la relación carbono/nitrógeno para el proceso AINI.



**FIGURA 7.32.** Cinética de humedad. Experimento AINI.

### 7.3.10. Cinética de actividad de agua.

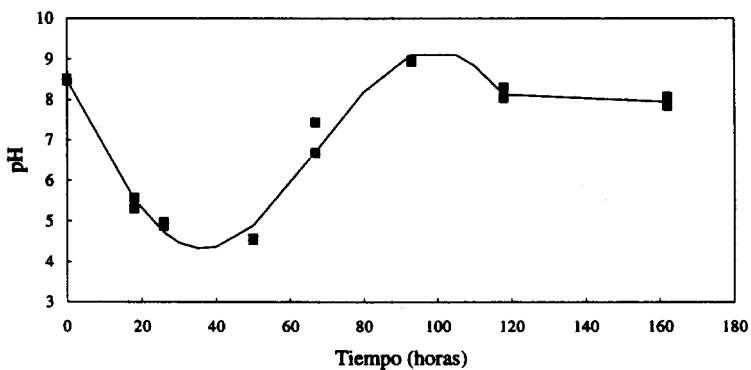
En la Figura 7.33. se presenta la cinética de actividad de agua del experimento AINI. La actividad de agua fue mayor que en el experimento AGI, debido a que la humedad inicial también fue mayor en la corrida AINI. Se observa además que aumentó en el transcurso del proceso a valores cercanos a 0.99, debido al consumo de la sacarosa (que es un soluto que hace disminuir la  $A_w$ ) y por otra parte a la capacidad de absorción de agua que presentó el bagacillo.



**FIGURA 7.33.** Cinética de actividad de agua. Experimento AINI.

### 7.3.11. Cinética de pH.

El comportamiento del pH durante las 162 horas del proceso se muestra en la Figura 7.34. De igual forma que para los dos experimentos anteriores se obtuvo una disminución inicial del valor del pH, debido al consumo de sacarosa y formación de ácidos orgánicos, y posteriormente se observó que aumentó a valores alcalinos (8.5) al final del composteo.



**FIGURA 7.34.** Cinética de pH, experimento AINI.

## 7.4. DISCUSION GENERAL

### 7.4.1. Cinética de temperatura.

De las cinéticas de temperatura obtenidas en los tres diferentes experimentos puede observarse como la implementación del control diferencial de temperatura ayudó a que la temperatura se elevará arriba de los 60°C y siguiera las patrones típicos de temperatura a nivel industrial (Crawford, 1983; Gray y Biddlestone, 1974), además de permitir que la temperatura del material dentro del reactor y las columnas fuera homogénea.

Los gradientes radiales, en los tres experimentos, se mantuvieron entre 0.6 y 0.8 °C/cm cuando la temperatura fue elevada, disminuyendo alrededor de 0.2 cuando se enfrió el material. El gradiente axial fue mayor en el sistema en que se implementó el CDT, debido a que se perdió mayor calor por convección, alcanzando valores hasta de 1.0 °C/cm.

### 7.4.2. Cinética de pérdida del material a compostear.

La pérdida del material a compostear fue similar en los tres experimentos, en la corrida AINI se obtuvo una mayor degradación del material medida con la pérdida del material a compostear. La pérdida del material a compostear estuvo, para los tres estudios, en el rango establecido del 30 a 50% de pérdida de materia volátil (Iannotti y col., 1993; Marugg y col., 1993; Nakasaki y col., 1990; Nakasaki y col., 1986). También se observó que la velocidad de pérdida del material a compostear fue mayor en la etapa termofílica y en el período en que se degradó la fuente de carbono de difícil degradación la velocidad disminuyó, tal como lo reportó Hammouda y Adams (1986).

La constante de velocidad de reacción para los tres experimentos fue similar, aproximadamente igual a  $0.58 \pm 0.09$  horas<sup>-1</sup>, observándose una rápido descenso luego de las 50 horas del proceso, en que se mantuvo casi constante e igual al 0.02 horas<sup>-1</sup>, lo que indica que este valor es un parámetro propio de los sistemas utilizadas (mezcla de bagacillo de caña y lodos activados)

### 7.4.3. Consumo de azúcares solubles.

El consumo de azúcares presentó una tendencia similar en los tres experimentos, un consumo total de ellos al inicio de la etapa termofílica. Puede observarse que el consumo de dichos azúcares es el promotor de la generación de calor metabólico en el sistema.

### 7.4.4. Cinética de carbono.

La disminución en el contenido de carbono fue semejante en los tres experimentos y a la vez fue igual a la pérdida del material a compostear, indicando de esta forma que la mayor pérdida de material a compostear se debió al consumo de carbono.

La velocidad de disminución del contenido de carbono fue mayor en la primera etapa del proceso debido al consumo de la fuente de carbono de fácil degradación.

#### **7.4.5. Cinética de nitrógeno.**

Como se muestra en los experimentos en que se utilizó el CDT la temperatura aumentó arriba de los 55°C (temperatura óptima de composteo), en ambos experimentos se observó una disminución en el contenido de nitrógeno en la etapa termofílica que a la vez coincidió con la evolución de amoníaco. De tal forma que podría relacionarse la temperatura elevada que se alcanzan en los sistemas con la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco, tal como la han descrito Bonazzi y col. (1990).

#### **7.4.6. Cinética de la relación carbono/nitrógeno.**

Debido a que en los experimentos AGNI y AINI se perdió nitrógeno, la relación carbono/nitrógeno aumentó al final de la etapa termofílica. Se ha utilizado dicha relación como una medida de la estabilidad del material a compostear, ya que en este trabajo, se ha estudiado más a fondo los cambios que se producen, puede observarse como esta relación no disminuye de la forma en que se ha reportado (Zuconni y de Bertoldi, 1986; Crawford, 1983; Gray y Biddlestone, 1974), esperando que luego de la etapa de maduración se pudiera alcanzar valores cercanos a 15, en que se obtendría un material completamente estable, ya que no se volatilizaría el nitrógeno.

#### **7.4.7. Cinética de humedad.**

En los tres experimentos la humedad aumentó y se mantuvo cercana al 82% observándose una buena degradación del material (30%), la humedad alta alcanzada en estos sistemas se debió al agente de volumen utilizado pues se ha reportado que es capaz de absorber hasta el 85% de agua (ICIDCA, 1990).

#### **7.4.8. Cinética de pH.**

Las cinéticas de pH obtenidas en los tres experimentos fue la típica descrita en la literatura (Zuconni y de Bertoldi, 1986, Crawford, 1983). Una disminución en su valor debido al consumo de la sacarosa y producción de ácidos orgánicos y luego un aumento a valores ligeramente alcalinos debido a la degradación de las proteínas, produciendo amoníaco.

### **7.5. CONCLUSIONES**

El CDT fue un sistema de control de temperatura que permitió disminuir los gradientes de temperatura entre el material a compostear y el medio de temperatura controlada, y por lo tanto se homogeneizó la temperatura del material del reactor y columnas.

Se observó además la estrecha relación entre las temperaturas y la producción de amoníaco, lo que sugiere diseñar una estrategia de control de la temperatura que permita eliminar los microorganismos patógeno y a la vez evite la evolución de amoníaco.

La utilización de las fracciones más finas del bagacillo de caña pudo ser un factor que aumentara la degradación del material a compostear, ya que se obtuvo un 7% más de pérdida del material a compostear en el experimento AINI.

En cuanto a la relación carbono/nitrógeno, puede observarse que no es un factor concluyente en la determinación del grado de descomposición del material.

## 8. BALANCES DE CALOR.

Debido a que en el proceso de composteo es importante la generación de calor metabólico, para mantener la temperatura elevada y con ello conseguir una mejor degradación del material y eliminar los microorganismos patógenos presentes, es necesario poder cuantificarlo y de esa forma optimizar su utilización para un mejor desarrollo del proceso.

Hay que hacer notar que los resultados obtenidos son propios del sistema utilizado, y lo que puede evaluarse con ello son la magnitud de los cambios que pueden registrarse en cada etapa del proceso.

### 8.1. CALOR METABOLICO PRODUCIDO.

La ecuación balance de calor que se utilizó para el cálculo del calor metabólico producido fue (ecuación 5.12.):

$$-\Delta H_{\text{met}} = \rho_m C_{p_m} \frac{dT_m}{dt} - \frac{G_{\text{a}}}{V_{\text{comp}}} \cdot \{[\rho_{\text{a}} \cdot h_{\text{a}}] - [\rho_{\text{m}} \cdot h_{\text{m}}]\} - A_{\text{Tcomp}} U (T_m - T_b) - Q_{\text{ag}} \frac{G_{\text{a}} P_{\text{a}}}{V_{\text{comp}}} [\gamma_c - \gamma_s] \quad (5.12.)$$

En la Tabla 8.1. se muestra las constantes utilizadas para el cálculo del calor metabólico para los tres experimentos realizados.

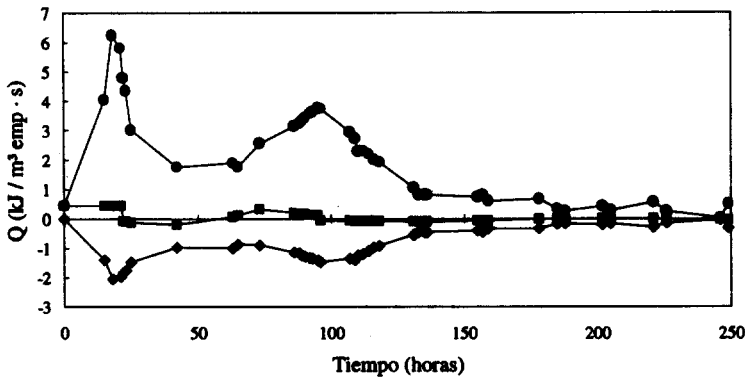
#### 8.1.1. Experimento AGI.

En la Figuras 8.1. y 8.2. se muestran los diferentes mecanismos por los cuales existió intercambio de calor para este experimento. Puede observarse como a lo largo del proceso no existió mucha acumulación de calor, debido a que en este experimento se observó una gran pérdida de calor por conducción, ya que no fue utilizado el CDT. Es importante observar también como el calor latente de vaporización y el convectivo tienen valores parecidos durante el proceso, y además son mucho mayores cuando la temperatura del material es elevada, por lo que logran remover una gran cantidad de calor, que no es posible removerlo por vía conductiva.

En cuanto al calor metabólico generado, se muestra que sigue con el patrón de temperatura, debido a que en el momento en que la temperatura empezó a elevarse se empezó a generar calor metabólico, disminuyendo lentamente, hasta que al final del proceso en que el material se encontró a la temperatura del medio aislante ya no hubo más producción de calor metabólico que hiciera que la temperatura se mantuviera elevada.

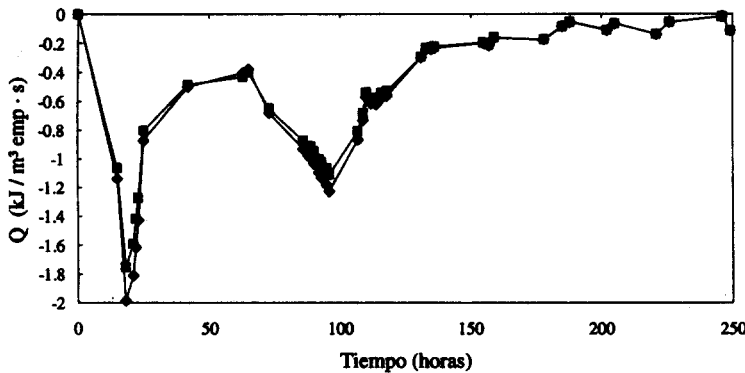
TABLA 8.1 Constantes para el cálculo del calor metabólico.

CONSTANTES	AGI	AGNI	AINI	UNIDADES
Densidad de empaque	497.35	524.00	550.00	kg/m <sup>3</sup> empaque
Cp material a compostear	3.316	3.316	3.316	kJ/kg °C
Densidad aire	1.001	1.001	1.001	kg/m <sup>3</sup>
Gasto aire en el reactor	0.027	0.027	0.027	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> empaque·s
Espesor de la pared reactor	0.0065	0.0065	0.0065	m
Conductividad térmica acrílico	0.0586	0.0586	0.0586	J/ m s °C
Area especifica	20.0	20.0	20.0	1/m
Diámetro externo reactor	0.2265	0.2265	0.2265	m
Velocidad medio aislante	0.060	0.060	0.004	m/s
μ medio aislante	0.001	0.001	0.000	Pa · s
Cp medio aislante	4178.4	4178.4	1005.7	J/kg·°C
k medio aislante	0.628	0.628	0.026	J/m·s·°C
Densidad medio aislante	1000.000	1000.000	1.001	kg/m <sup>3</sup>
Diámetro promedio de partícula	0.00265	0.00265	0.00265	m
μ aire	1.98E-05	1.98E-05	1.98E-05	kg/m·s
Calor latente de evaporación	2.30E06	2.30E06	2.30E06	J/kg agua
Número de Reynolds	13590.0	13590.0	52.9	adimensional
Número de Prandtl	6.651	6.651	0.696	adimensional
Cr	0.193	0.193	0.613	adimensional
m	0.618	0.618	0.466	adimensional
ho	519.361	519.361	105.123	J/m <sup>2</sup> ·s·°C
hi	360.762	360.762	0.427	J/m <sup>2</sup> ·s·°C
U	8.564	8.564	0.406	J/ m <sup>2</sup> ·s·°C



**FIGURA 8.1.** Transferencia de calor. Experimento AGI.

Calor metabólico [- $\Delta H_{met}$ ] (●); calor acumulado (■); calor conductivo (◆).

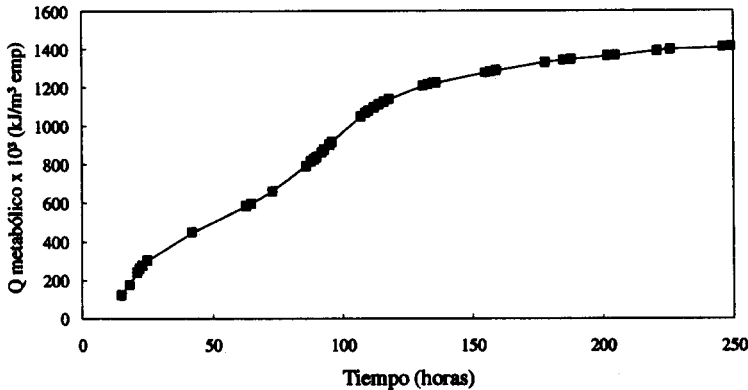


**FIGURA 8.2.** Transferencia de calor. Experimento AGI.

Calor convectivo (■); calor latente de vaporización (◆).

En la Figura 8.3. se muestra el calor total metabólico producido durante el proceso AGI. A lo largo de las 250 horas de proceso se desarrollaron  $-1.6 \times 10^6$  kJ de calor metabólico/ $m^3$  de empaque. Haug (1993) reporta que por cada gramo de lodo seco se generan 5,560 cal, convirtiendo este valor a la cantidad de lodos iniciales del proceso, se debería generar  $-4.5 \times 10^4$  kJ/ $m^3$  empaque, y si se calcula por la cantidad de sacarosa agregada al inicio, el valor teórico de generación de calor, suponiendo que toda la sacarosa se convierte a  $CO_2$  y  $H_2O$  sería de  $-5.86 \times 10^5$  kJ/ $m^3$  empaque. La cantidad de calor evolucionado fue mayor que el esperado con ambos valores teóricos, pero hay que tomar en cuenta que existe otra fuente de carbono además de la sacarosa,

que aún cuando sea de difícil degradación, existen microorganismos que la degradan y generan calor al descomponerla.



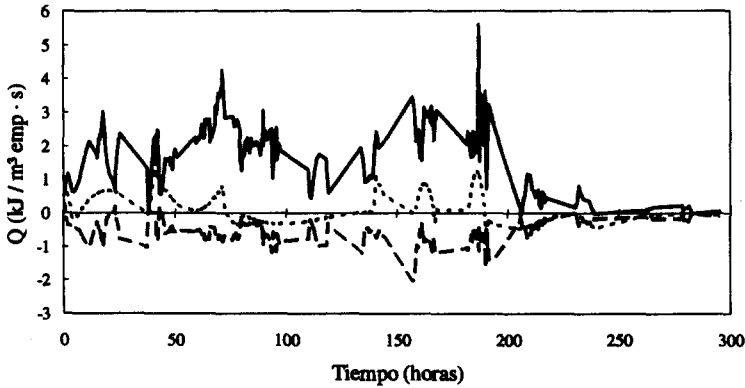
**FIGURA 8.3.** Calor metabólico total producido durante el proceso AGI.

Si se divide el proceso en las tres etapas básicas (mesofílica, termofílica y de enfriamiento), se observa como en la primera de ellas (del inicio a 20 horas) se genera el 15% del calor total del sistema; en la termofílica (de las 20 a las 80 horas) se genera el 47%, y en la última etapa el 38% del calor metabólico total.

### 8.1.1. Experimento AGNI.

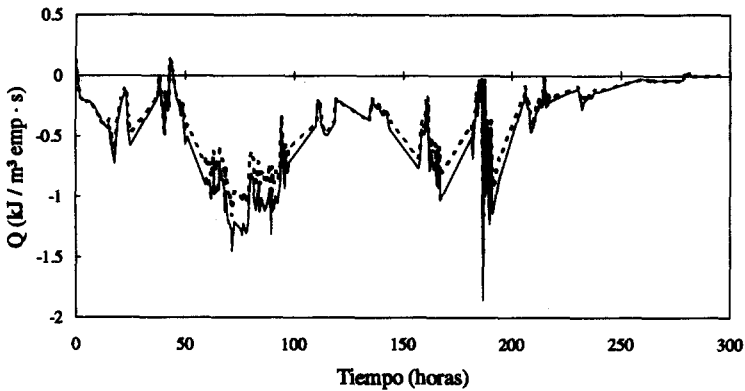
En las Figuras 8.4. y 8.5. se presenta la cinética de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en el experimento AGNI. En esta corrida existió una mayor acumulación de calor, debido a que en el sistema se implementó el CDT, y por lo tanto la remoción de calor convectivo y latente de vaporización no fue suficiente para remover el calor metabólico generado, debido a que el calor perdido en forma conductiva disminuyó.

Se observa nuevamente como el calor metabólico generado es mayor en el período en que la temperatura se elevó y disminuye lentamente hasta valores negativos. También se muestra como el término de calor latente de vaporización es nuevamente mayor que la contribución del convectivo.



**FIGURA 8.4.** Transferencia de calor. Experimento AGNI.

Calor metabólico [- $\Delta H_{met}$ ] (—); calor acumulado (· · ·); calor conductivo (- · -).



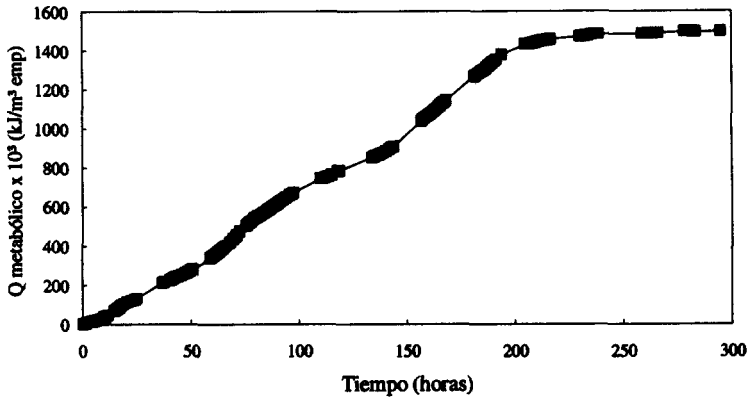
**FIGURA 8.5.** Transferencia de calor. Experimento AGNI.

Calor convectivo (· · ·); calor latente de vaporización (—).

En la Figura 8.6. se presenta el calor metabólico total producido en el experimento AGNI. La cantidad total de calor metabólico generado en este experimento fue de  $-1.5 \times 10^6$  kJ/m<sup>3</sup> empaque. Nuevamente el calor esperado por gramo de sacarosa agregado era de  $-4.8 \times 10^5$  kJ/m<sup>3</sup> empaque, y por la cantidad de lodos utilizados fue de  $-4.27 \times 10^4$  kJ/m<sup>3</sup> empaque.

Haciendo nuevamente un balance de calor para cada etapa del proceso se observa como en la primera (del inicio a las 30 horas) se produjeron el 13% del calor total; en la etapa termoflica,

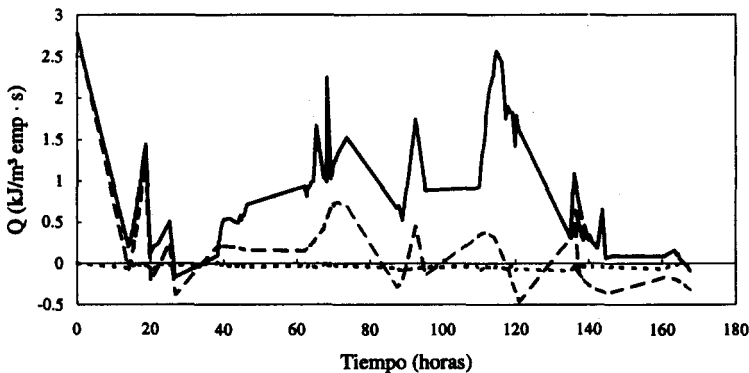
las más larga en el experimento (30 a 200 horas) se produjo el 80% del calor metabólico; y en la etapa de enfriamiento solamente se produjo un 7% del calor metabólico.



**FIGURA 8.6.** Calor metabólico total producido en la corrida AGNI.

### 8.1.3. Experimento AINI.

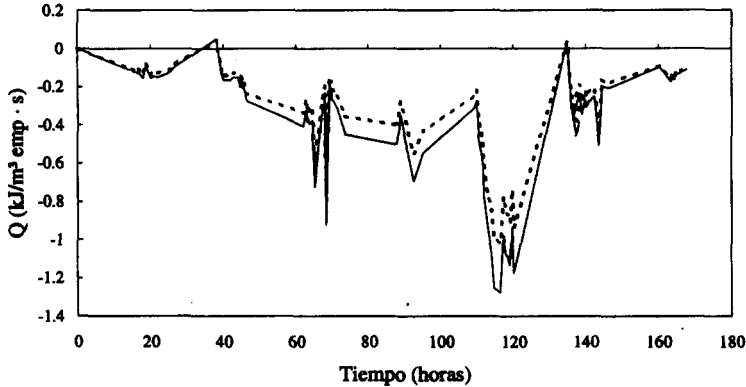
En las Figuras 8.7. y 8.8. se muestra la cantidad de calor transferido en el experimento AINI. Para este experimento, la cantidad de calor perdido en forma conductiva fue mínima, y por lo tanto se acumuló mayor cantidad de calor en el sistema. La cantidad de calor latente de vaporización perdido fue similar al convectivo.



**FIGURA 8.7.** Transferencia de calor. Experimento AINI.

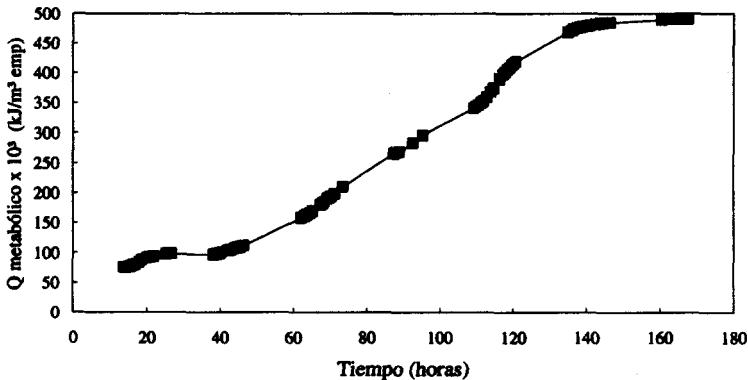
Calor metabólico  $[-\Delta H_{met}]$  (—); calor acumulado (- -); calor conductivo (· · ·).

Se aprecia nuevamente que la mayor generación de calor metabólico se da cuando las temperaturas del sistema son elevadas, siendo al final del proceso aproximadamente igual a cero.



**FIGURA 8.8.** Transferencia de calor. Experimento AINI.  
Calor convectivo (---); calor latente de vaporización (—).

En la Figura 8.9. se muestra la gráfica de generación de calor metabólico para el experimento AINI. El calor metabólico total producido fue de  $-5.0 \times 10^5$  kJ/m<sup>3</sup> empaque. El valor teórico esperado debido al consumo de la sacarosa inicial agregada fue de  $-3.8 \times 10^5$  kJ/m<sup>3</sup> empaque y de la proporción de lodos agregados al inicio del proceso fue de  $-4.7 \times 10^4$  kJ/m<sup>3</sup> empaque.



**FIGURA 8.9.** Generación de calor metabólico. Experimento AINI.

Si se compara la cantidad de calor generado por etapa del proceso se tiene que en la etapa mesoflica o de calentamiento (primeras 60 horas) se produjo el 30% del calor metabólico; en la segunda etapa (siguientes 60 horas) se generó el 56% del calor producido metabólicamente; y en la última se produjo el 14% del calor de reacción. Puede observarse que nuevamente fue en la etapa termoflica donde se produjo la mayor cantidad de calor metabólico, debido a la máxima actividad microbiana y de descomposición que se observa en dicha etapa.

## 8.2. DISCUSION GENERAL.

Bach y col. (1987) han estimado parámetros de transferencia de calor para su sistema y para un proceso a escala industrial, determinando además como contribuye cada mecanismos de transferencia de calor en el reactor aislado que utilizan. En la Tabla 8.2. se muestra la distribución de calor removido para los tres experimentos anteriores y el presentado por Bach y col. (1987).

**TABLA 8.2.** Contribución de los diferentes mecanismos de transferencia de calor.

	AGI (%)	AGNI (%)	AINI (%)	Laboratorio (Bach y col., 1987) (%)	Industrial (%)
Calor convectivo	26.74	26.1	34.6	3.3	12.4
Calor conductivo	43.25	31.6	4.2	61.6	10.9
Calor evaporación	28.28	31.5	42.5	34.4	75.8
Calor acumulado	1.73	10.8	18.7	0.8	0.9

Puede observarse como en los experimentos AGI el calor conductivo es uno de los mecanismos más importantes por el cual se pierde el calor metabólico, concordando con los resultados presentados por Bach y col. (1987). La acumulación de calor en el sistema AGI es pequeña, por lo cual se asegura que el calor producido se está removiendo además por la vía convectiva y de vaporización. Se nota como la implementación del CDT en el experimento AGNI disminuyó la pérdida de calor por conducción, y por lo tanto si se piensa en una estrategia de control, sería necesario suministrar mayor cantidad de aire al material para evitar la acumulación de calor que se produjo. La acumulación de calor en el experimento AINI fue mucho mayor que en los dos experimentos anteriores debido a que el calor removido por la vía convectiva no fue suficiente para evitar la acumulación de calor. Pero además estos resultados muestran que en este caso es predominante la pérdida de calor por medio de la vaporización del agua, tal como se presente a nivel industrial. No hay que olvidar al comparar estos resultados, que las condiciones en que se desarrolla el experimento AINI, son diferentes a las que normalmente ocurren en pilas

composteras industrialmente, debido a que en experimento se utilizó aireación forzada y por ello el término de calor convectivo es alto.

Al realizar los balances de calor de los diferentes sistemas, el calor metabólico generado en ellos fue mucho mayor al esperado teóricamente; hay que observar además que no solamente se utilizó sacarosa como fuente de carbono, sino que el bagacillo de caña era aportador de celulosa, que también fue degradada a lo largo del proceso y por ello se observa una mayor producción de calor.

Ya que el consumo de sacarosa se llevó a cabo en la primera etapa del proceso se esperaba que el calor teórico que se generaría por la adición de sacarosa debía presentarse en esta etapa, pero no se obtuvo debido a que no toda la calor generada en el consumo de la sacarosa se utilizó para producir  $\text{CO}_2$ , más bien fue utilizada para la producción de otros metabolitos en el proceso, tales como ácidos orgánicos, pues es en esta etapa también en que el pH es ácido debido a su presencia.

### 8.3. CONCLUSIONES.

Para evitar la acumulación de calor metabólico es necesario suministrar mayor cantidad de aire al sistema, ya que de esa forma por diferencia de temperatura, se lograría eliminar calor por vía convectiva y de evaporación.

Además el sistema utilizando medio aislante el aire, fue mucho más eficiente en la distribución de calor, como lo presentan los resultados anteriores, pues fue en este caso que se generó menos calor metabólico y se perdió menos por la vía conductiva, que a la larga no es aprovechado en el sistema, obteniéndose una pérdida de material a compostear del 37%.

Es importante también hacer un énfasis en el estudio de la etapa termofílica del proceso, pues es en ella donde se observa la mayor producción de calor, y por lo tanto debía pensarse en alguna forma de poder optimizar esta producción con el fin de que el proceso sea más eficiente y mejor controlado.

## 9. POBLACIONES DE MICROORGANISMOS, MACROFAUNA Y MACROFLORA CUANTIFICADAS DEL EXPERIMENTO AINI.

### 9.1. POBLACIONES DE MICROORGANISMOS AISLADAS DE LOS LODOS ACTIVADOS.

Para la determinación de la cantidad y características de los microorganismos provenientes de los lodos activados utilizados en el experimento AINI se realizaron cuantificaciones de bacterias: mesófilas y termófilas y coliformes; actinomicetos: mesófilos y termófilos y hongos . En la Tabla 9.1. se presentan los resultados obtenidos.

**TABLA 9.1. Microorganismos nativos en los lodos activados.**

Bacterias mesófilas	2.2x10 <sup>8</sup> u.f.c./g m.s.
Bacterias termófilas	ND
Actinomicetos mesófilos	ND
Actinomicetos termófilos	ND
Bacterias patógenas	2.7x10 <sup>9</sup> u.f.c./g m.s.
Hongos	2.4x10 <sup>4</sup> u.f.c./g m.s.

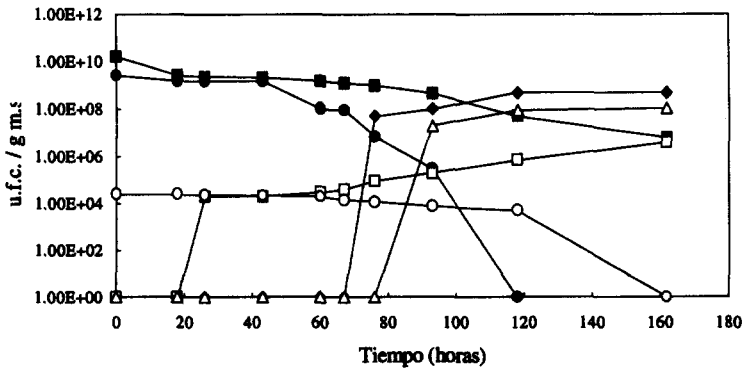
### 9.2. CINÉTICA DE MICROORGANISMOS.

A lo largo del proceso de composteo se dio una sucesión de microorganismos los cuales se desarrollaron dependiendo de la etapa en que se encontraba el proceso, caracterizada por la temperatura y la fuente de carbono existente. Con el fin de determinar como evolucionaron los microorganismos a lo largo del composteo se siguieron las cinéticas de aparición y desaparición de las diferentes poblaciones.

Las poblaciones cuantificadas fueron: bacterias mesófilas y termófilas, actinomicetos mesófilos y termófilos, bacterias coliformes y hongos. La cinética de todas ellas se presenta en la Figura 9.1.

Como puede observarse al inicio del proceso existía una población considerable de bacterias coliformes (2.7 x 10<sup>9</sup> u.f.c/g. m.s.) que se mantuvieron constantes hasta las 40 horas, desapareciendo por completo después de las 90 horas. Comparando estos resultados con la cinética de temperatura de la corrida AINI (Figura 7.23.) a las 40 horas empieza la etapa termofílica del proceso (temperaturas cercanas a los 45°C) que permitieron que disminuyera la población de coliformes hasta desaparecer cuando la temperatura alcanzó el máximo (aproximadamente a las 90 horas), observándose que aún cuando la etapa termofílica no duró tanto tiempo como en los proceso normales de composteo fue lo suficientemente larga para que

desaparecieran por completo los microorganismos patógenos presentes al inicio. La manera más eficaz de eliminar los patógenos de los lodos activados es, tal como lo cita Parr y col. (1978), el composteo, debido a que se alcanzan temperaturas mayores a los 55°C por muchos días. Mientras que el calor es el factor más importante para eliminar los patógenos, también se mencionan tres factores adicionales: (a) efecto antibiótico o antagonista de los microorganismos no patógenos a los patógenos; (b) competencia por la fuente de carbono, energía y nutrientes entre los no patógenos y patógenos; (c) el tiempo en que las condiciones no son favorables para los patógenos (Parr y col., 1978).



**FIGURA 9.1.** Cinética de microorganismos aislados del material a compostear. Experimento AINI. (■) bacterias mesófilas; (◆) bacterias termófilas; (●) bacterias coliformes; (○) actinomicetos mesófilos; (□) actinomicetos termófilos; (△) hongos.

En cuanto a las poblaciones de bacterias mesófilas se observa que disminuyeron lentamente durante las primeras 75 horas del proceso y luego de éste período sufrieron una reducción pronunciada, coincidiendo con la aparición de las bacterias y actinomicetos termófilos. En cuanto a los actinomicetos mesófilos se muestra que aparecieron después de las 24 horas de composteo, aumentado su número a lo largo del proceso. Nakasaki y col. (1985), encontraron las poblaciones de actinomicetos mesófilos y bacterias termófilas desde el inicio del proceso, debido a que ellos utilizaron como inóculo composta madura obtenida por ellos en experimentos anteriores, y ya que en estos experimentos la fuente de inóculo solamente fueron los lodos activados puede observarse que se desarrollaron todas las poblaciones degradadoras y estabilizadoras de la materia orgánica.

En cuanto a la población de hongos, se observa que se presentó en todo el proceso, aún cuando en menor número que el resto de los microorganismos cuantificados, disminuyendo lentamente después de las 70 horas hasta desaparecer por completo al final del proceso. Hay que

añadir además que solamente se aisló un tipo de hongo en todo el proceso. Corominasi y col. (1986) cuantificaron en la etapa mesoflica la mayor cantidad de hongos ( $2.1 \times 10^6$ ), observando que disminuyó, hasta tener en la etapa de maduración de  $2.0 \times 10^3$ , puede observarse que en la primera etapa, la composta que realizaron contaba con mayor cantidad de hongos pero al final del proceso se obtuvo la misma cantidad de colonias de hongos.

### 9.3. CINÉTICA POBLACIONAL DE MACROFAUNA Y MACROFLORA.

En la Figura 9.2. se presenta la cinética de protozoarios y algas cuantificados en el material a compostear. En la Figura 9.3. la de los asquelmintos y la cinética de las formas resistentes de vida.

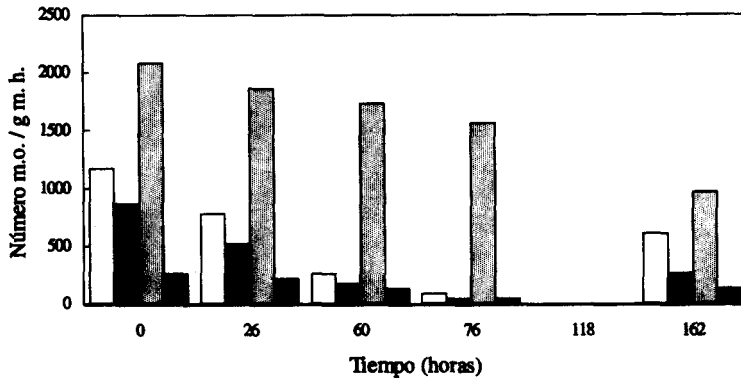
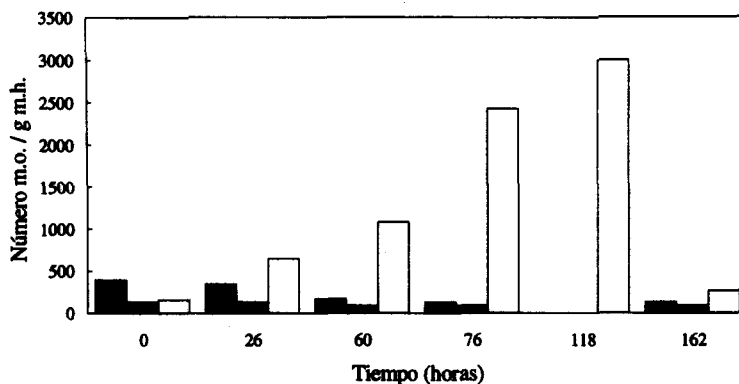


FIGURA 9.2. Cinética de protozoarios: (□) ciliados; (■) amibas. Y algas: diatomeas (▨) y verde-azul (■).

Los protozoarios ciliados, las algas diatomeas y las formas resistentes de vida son las poblaciones más abundantes y mejor adaptadas a las condiciones físicas del sistema. Puede observarse claramente que existió una tendencia a disminuir a medida que el proceso avanzó y la temperatura aumentó.

Al inicio del proceso se obtuvo la mayor abundancia y diversidad de microorganismos, siendo además, su movilidad y grado de hidratación superior.

Puede observarse en la cinética de las formas de vida resistentes que conforme el proceso se desarrollaba, aumentó la presencia de quistes, esporas y huevecillos. Observándose además en el período de 60 y 75 horas, una alta proporción de cubiertas externas inanimadas: conchas, caparazones y paredes celulares.



**FIGURA 9.3.** Cinética de asquelmintos: rotíferos (■) y nemátodos (■). Y de las formas resistentes de vida (□).

Cuando la temperatura del material alcanzó 60°C las condiciones fueron extremas para permitir la vida sin protección. Muchos microorganismos murieron, mientras que los más aptos activaron sus mecanismos de defensa resguardándose dentro de alguna forma de resistencia característica a su especie. Sin embargo, cuando la temperatura bajó nuevamente a 30°C, volvieron a aparecer formas de vida no encapsuladas pero ahora estas formas presentaban una característica de latencia muy particular, es decir, que carecían de movimiento, esperando mejoraran las condiciones ambientales para activarse. De allí, que no todas las formas encapsuladas se regeneraron y las que lo hicieron no pudieron recolonizar el material.

Tal como lo ha expresado Téllez (1991), los ciliados en condiciones aeróbicas pueden estimular el crecimiento bacteriano, acelerando el proceso de descomposición. Por otro lado las algas colaboran en el proceso de oxigenación a partir del CO<sub>2</sub> que los microorganismos aerobios sintetizan, manteniendo y acelerando así la estabilización del material.

#### 9.4. DISCUSION GENERAL.

Los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales fueron fuente de las diferentes poblaciones de microorganismos que se presentan durante el proceso de composteo, siendo buena fuente de inóculo degradador y estabilizador del material orgánico.

Existe una estrecha interacción entre los microorganismos que normalmente se han estudiado en sistemas de composteo con la macroflora y macrofauna que se presentó en la mezcla, por lo que debe estudiarse con más profundidad y aprovechar así los beneficios que puedan

aportar al proceso de degradación. Siendo un punto importante de mencionar que la temperatura no es factor limitante para la desaparición de todos ellos, porque tienen sus propios mecanismos de defensa que pueden activar en situaciones de "stress" y desactivar cuando las condiciones vuelven a ser idóneas.

#### **9.5. CONCLUSIONES.**

Debido a que se alcanzaron temperaturas arriba de los 50°C, por un período de 100 horas, se logró eliminar a los microorganismos patógenos que provenían de los lodos activados.

Puede observarse además como tanto en la etapa mesofílica y termofílica la población predominante fueron las bacterias mesófilas y termófilas, respectivamente.

Las poblaciones de actinomicetos aumentaron al aumentar la temperatura, siendo los encargados de la degradación y estabilización final del material volátil al final del proceso de composteo.

# **CONCLUSIONES GENERALES**

## 10. CONCLUSIONES GENERALES

- El sistema modelo utilizado en los experimentos permitió reproducir el proceso de composteo, con la ventaja de que se pudieron realizar mediciones más finas de los cambios e interacciones que se llevaron a cabo.
- Los lodos activados provenientes del tratamiento de aguas residuales fueron fuente de los microorganismos necesarios para que el proceso de composteo proceda, por lo que este proceso puede ser una alternativa con buenas posibilidades para degradar y estabilizar los lodos.
- El sistema de control diferencial de temperatura permite llevar un buen control de la temperatura del medio aislante siendo semejante ésta a la del material a compostear empacado en el reactor y por lo tanto disminuye los gradientes de temperatura del material a compostear, por lo que las condiciones de temperatura fueron homogéneas tanto en el material del reactor de acrílico como el empacado en las columnas de fermentación.
- Aún cuando el gradiente de temperatura fue mayor cuando se utilizó aire como medio aislante, permitió seguir las cinéticas del proceso, facilitando el manejo de los reactores y variables que se controlaron.
- En períodos de composteo tan cortos (5 días) se logró un 30% de disminución del material a compostear. Esta disminución correspondió al consumo de carbono, de tal forma que el material perdido durante el proceso es principalmente carbono que se volatilizó en forma de  $\text{CO}_2$ . En las primeras horas de la etapa termofílica se observó que la velocidad de disminución del material a compostear y el consumo de carbono fue mayor, debido a que fue en éste período en que se consumieron los azúcares solubles.
- La evolución de amoníaco en la corriente gaseosa a la salida, está estrechamente relacionada con las altas temperaturas alcanzadas en los experimentos, por lo que se recomienda que se lleve un control de temperatura que admita que la temperatura no se eleve más de  $55^\circ\text{C}$ .
- En el experimento en que no se utilizó el control diferencial de temperatura el mecanismo de transferencia de calor por el que se perdió en mayor proporción el calor metabólico producido fue el conductivo, por lo que la utilización del sistema de control permite minimizar esta pérdida. En los otros dos experimentos se acumuló una mayor proporción de calor, debido a

## CONCLUSIONES GENERALES

que los mecanismos convectivos y latente de vaporización no fueron capaces de remover todo el calor metabólico producido.

- Con las ecuaciones generales de los balances de energía pudo calcularse de una forma fácil y conveniente la cantidad de calor que se produjo por el metabolismo microbiano.
- De forma general puede decirse que es importante un estudio más detallado y especial de la etapa termofílica del proceso de composteo, que es en donde se producen los cambios más importantes en el composteo y controlando dicha etapa puede acelerarse la degradación de la materia volátil.

## ***REFERENCIAS***

## 11. REFERENCIAS.

1. APHA, AWWA, y WPCF. (1989). **Standar methods for analysis of water and wastewater.** Décimoséptima edición.
2. Ashbolt, N.J. y M.A. Line. (1982). **A bench-scale system to study the composting of organic wastes.** *Journal of Environmental Quality.* 12: 405-408.
3. Atchley, S.H. y J.B. Clark. (1979). **Variability of temperature, pH and moisture in an aerobic composting process.** *Applied and Environmental Microbiology.* 38: 1040-1044.
4. Bach, P.D., M. Shoda y H. Kubota. (1984). **Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermal reactor.** *Journal of Fermentation Technology.* 62: 285-292.
5. Bach, P.D., M. Shoda y H. Kubota. (1985). **Composting reaction rate of sewage sludge in an autothermal packed bed reactor.** *Journal of Fermentation Technology.* 63: 271-278.
6. Bach, P.D., K. Nakasaki, M. Shoda y H. Kubota. (1987). **Thermal balance in composting operations.** *J. Ferment. Technol.* 65: 199-209.
7. Bonazzi, G., L. Valli y S. Piccinini. (1990). **Controlling ammonia emission at composting plants.** *BioCycle.* Junio: 68-71.
8. Burges, A: (1987). **Microbiolgy of the soil.** Academic Press Inc. New York.
9. Cannel, E. y M. Moo-Young. (1980). **Solid-State fermentation systems.** *Process Biochemistry.* Agosto/Septiembre: 24-28
10. Chanyasak, V. y H. Kubota. (1981). **Carbon/organic nitrogen ratio in water extract as measure of composting degradation.** *Journal of Fermentation Technology.* 59: 215-219.
11. Corominas, E., F. Perestelo, M.L. Pérez y M.A: Falcon. (1986). **Microorganisms and environmental factors in composting of agricultural waste of the Canary Islands.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucchini. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
12. Crawford, J.H. (1983). **Composting of agricultural wastes. A review.** *Process Biochemistry.* Enero/Febrero: 14-18.
13. Dubois, M., K.A. Gilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers y F. Smith. (1956). **Colorimetric method for determination of sugars and related substances.** *Anal. Chem.* 28: 350-356.

14. Durán, A., D: Cervantes, J. de Victorica y E. Vega. (1992). **Planta de tratamiento de aguas residuales de C.U. Folleto Informativo.** Dirección General de Obras. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Ciudad Universitaria.
15. Ferrari, G. (1986). **Oxygen, water and temperature in the decomposition of an organic substance during composting.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
16. Finstein, M.S. y M.L. Morris. (1975). **Microbiology of municipal solid waste composting.** *Advances in Applied Microbiology.* 19: 113-153.
17. Finstein, M.S., F.C. Miller y P.F. Strom. (1986). **Monitoring and evaluating composting process performance.** *Journal WPCF.* 58: 272-278.
18. Fitzpatrick, G.E. (1993). **A program for determining cocompost blending ratios.** *Compost Science and Utilization.* Verano: 30-33
19. Gervais, P. (1989). **New sensor allowing continuous water activity measurement of submerged or solid-substrate fermentations.** *Biotechnology and Bioengineering.* 33: 266-271.
20. Goodhue, C.T., J.P. Rosazza y G.P. Peruzzoti. (1986). **Methods for transformation of organic compounds.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
21. Gray, K.R. y A.J. Biddlestone. (1974). **Decomposition of urban waste.** En: "Biology of plant liter decomposition". 2: 743-775.
22. Hammouda, G.H. y W.A: Adams. (1986). **The decomposition, humification and fate of nitrogen during the composting of some plant residues.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
23. Haug, Roger T. (1979). **Engineering principles of sludge composting.** *Journal WPCF.* 51: 2189-2206.
24. Haug, Roger T. (1993). **The practical handbook of compost engineering.** Lewis Publisher.
25. Hogan J.A., F.C. Miller y M.S: Finstein. (1989) **Physical modeling of the composting ecosystem.** *Applied and Environmental Microbiology.* 55: 1082-1092.
26. Iannotti, D.A., T. Pang, B.L. Toth, D.L. Elwell, H.M. Keener y H.A. Hoitink. (1993). **A quantitative respirometric method for monitoring compost stability.** *Compost Science & Utilization.* 1: 52-65.

27. Iglesias Jiménez, E. y V. Pérez García. (1992). **Determination of maturity for city refuse composts**. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **38**: 331-343.
28. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. (1990). **Manual de los derivados de la caña de azúcar**. Segunda edición.
29. Knudsen, James G. (1984). **Heat Transmission**. En: "Perry's Chemical Engineers' Handbook". International Edition. Editado por: R.H. Perry y D. Green. Sexta Edición.
30. Lonsane, B.K., N.P. Ghildyal, S. Budiartman y S.V. Ramakrishna. (1985). **Engineering aspects of solid state fermentation**. *Enzyme Microb. Technol.* **7**: 258-264.
31. Magalhães, A.M., P.J. Shea, M.D. Jawson, E.A. Wicklund y D.W. Nelson. (1993) **Practical simulation of composting in the laboratory**. *Waste Management & Research*. **11**: 143-154.
31. Marugg, C., M. Grebus, R.C. Hansen, H.M. Keener y H.A. Hoitink. (1993). **A kinetic model of the yard waste composting process**. *Compost Science & Utilization. Premier Issue*: 38-51.
32. McKinley, V.L. y J.R. Vestal. (1984). **Biokinetic analysis of adaptation and succession: microbial activity in composting municipal sewage sludge**. *Applied and Environmental Microbiology*. **47**: 933-941.
33. Minnich, J., M. Hunt y los editores de Organic Gardening Magazine. (1979). **The Rodale guide to composting**. The Rodale Press, Inc.
34. Morisaki, N., C.G. Phae, K. Nakasaki, M. Shoda, y H. Kubota. (1989). **Nitrogen transformation during thermophilic composting**. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. **67**: 57-61.
35. Mote, C.R y C.L. Griffis. (1979). **A system for studying the composting process**. *Agricultural Wastes*. **1**: 191-203.
36. Murillo, M., S. Santos y H. Valdivieso. (1994). **Diseño, construcción e instalación de un equipo de acondicionamiento y lavado de aire para una planta de composteo a nivel piloto**. Reporte de Servicio Social. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. México D.F.
37. Nakasaki, K., M. Sasaki, M. Shoda y H. Kubota. (1985a) **Change in microbial numbers during thermophilic composting of sewage sludge with reference to CO<sub>2</sub> evolution rate**. *Applied and Environmental Microbiology*. **49**: 37-41.

38. Nakasaki, K., M. Sasaki, M. Shoda y H. Kubota. (1985b). **Characteristic of mesophilic bacteria isolated during thermophilic composting of sewage sludge.** Applied and Environmental Microbiology. **49:** 42-45.
39. Nakasaki, K., M. Sasaki, M. Shoda y H. Kubota. (1985c). **Effect of seeding during thermophilic composting of sewage sludge.** Applied and Environmental Microbiology. **49:** 724-726.
40. Nakasaki, K., M. Shoda y H. Kubota. (1985d) **Effect of temperature on composting of sewage sludge.** Applied and Environmental Microbiology. **50:** 1526-1530.
41. Nakasaki, K., M. Shoda y H. Kubota. (1986). **Effects of bulking agent on the reaction rate of thermophilic sewage sludge composting** Journal of Fermentation Technology. **64:** 539-544.
42. Nakasaki, K., J. Kato, T. Akiyama y H. Kubota. (1987). **A new composting model and assessment of optimum operation for effective drying of composting material.** Journal of Fermentation Technology. **65:** 441-447.
43. Nakasaki, K., J. Kato, T. Akiyama y H. Kubota. (1987). **Transformation of water soluble organic materials during thermophilic composting of sewage sludge.** Journal of Fermentation Technology. **65:** 675-681.
44. Nakasaki, K. y T. Akiyama. (1988). **Effects of seeding on thermophilic composting of household organic waste.** Journal of Fermentation Technology. **66:** 37-42.
45. Nakasaki, K., H. Yaguchi, Y. Sasaki y H. Kubota. (1990). **Effects of oxygen concentration on composting of garbage.** Journal of Fermentation and Bioengineering. **70:** 431-433.
46. Nakasaki, K., H. Yaguchi, Y. Sasaki y H. Kubota. (1992). **Effects of C/N ratio on thermophilic composting of garbage.** Journal of Fermentation and Bioengineering. **73:** 43-45.
47. Parr, J.F., E. Epstein y G.B. Wilson. (1978). **Composting of sewage sludge for utilization as a fertilizer and soil conditioner.** FAO Soil Bulletin.
48. Pereira Neto, J.Y, E.I. Stentiford y D.D. Mara. (1986). **Comparative survival of pathogenic indicators in windrow and static pile.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucchini. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
49. Raimbult, M. y D. Alazard. (1980). **Culture method to study fungal growth in solid fermentation.** Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. **9:** 199-209

50. Rose, Anthony. (1977). **Microbiología Química. Introducción a la fisiología microbiana.** Segunda edición en español. Editorial Alhambra, S.A. España.
51. Roussos, S., M. Raimbault, J.P. Prebois, y B.K. Lonsane. (1993). **Zymotis, a large scale solid state fermenter. Design and evaluation** Applied Biochemistry and Biotechnology. **42:** 37-52.
52. Schumann, G.L., H. Soares, C.M. Holden, y M.S. Switzenbaum. (1993). **Relationship of traditional parameters of compost stability to turfgrass quality.** Environmental Technology. **14:** 257-263.
53. Sikora, L.J., M.A. Ramírez y T.A. Troeschel. (1983). **Laboratory composter for simulation studies.** Journal of Environmental Quality. **12:** 219-223.
54. Stentiford, E.I. y C.M. Dodds. (1992). **Composting** En: "Solid substrate cultivation". Editado por H.W. Doelle, D.A. Mitchell y C.E. Roltz. Elsevier Science Publisher Ltd.
55. Strom, P.F. (1985). **Identification of thermophilic bacteria in solid-waste composting.** Applied and Environmental Microbiology. **50:** 906-913.
56. Suler, D.J. y M.S. Finstein (1977). **Effect of temperature, aeration, and moisture on CO<sub>2</sub> formation in a bench-scale continuously thermophilic composting of solid waste.** Applied and Environmental Microbiology. **33:** 345-350.
57. Téllez, C. (1991). **The density of ciliate population in the production of the activated sludge performance.** Biological Approach to Sewage Treatment Process: Current Status and Perspectives: 49-59.
58. Viel, M., D. Sayag y L. Andre. (1986). **Optimisation of agricultural industrial wastes management through in-vessel composting.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
59. Witter, E. y J.M. López-Real. (1986). **Monitoring the composting process using parameters of compost stability.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.
60. Zucconi, F. y M. de Bertoldi. (1986) **Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste.** En "Compost: production, quality and use", editado por M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite y F. Zucconi. Elsevier Applied Science Publisher Ltd.

***ANEXO***

## ANEXO

### Nomenclatura.

$A_{Tesp}$	=	área específica del reactor [=] $m^2 / m^3$ de empaque
$c$	=	calor específico del medio de temperatura controlada [=] $J / kg \text{ } ^\circ C$
$C_{p_m}$	=	capacidad calorífica promedio del bagacillo y agua [=] $J / kg \cdot ^\circ C$
$C_r$	=	constante para cuerpos sumergidos [=] adimensional
$\frac{dT_m}{dt}$	=	derivada con respecto al tiempo de la temperatura del material [=] $^\circ C / s$
$G$	=	gasto másico del medio de temperatura controlada [=] $kg / m^2 s$
$G_a$	=	gasto de aire [=] $m^3 \text{ aire} / s$
$h_{ae}$	=	entalpía del aire a la temperatura de entrada [=] $J / kg \text{ aire}$
$h_{as}$	=	entalpía del aire a la temperatura de salida [=] $J / kg \text{ aire}$
$h_i$	=	coeficiente interno de transporte de calor o de película [=] $J / m^2 \text{ } ^\circ C s$
$h_o$	=	coeficiente externo de transferencia de calor convectivo [=] $J / m^2 \text{ } ^\circ C s$
$k_a$	=	conductividad térmica del aire [=] $J / m \text{ } ^\circ C s$
$k_r$	=	conductividad térmica del material del reactor [=] $J / m \text{ } ^\circ C s$
$k$	=	conductividad térmica del medio de temperatura controlada [=] $J / m s \text{ } ^\circ C$
$m$	=	constante para cuerpos sumergidos [=] adimensional
$Pr$	=	número de Prandtl [=] adimensional. Calculado como: $\frac{c\mu}{k}$
$Q_{ag}$	=	calor latente de vaporización del agua [=] $J / kg \text{ agua}$
$R$	=	constante de los gases [=] $8.21 J / ^\circ C \text{ mol}$
$Re$	=	número de Reynolds [=] adimensional. Calculado como: $\frac{\rho_e G}{\mu}$
$T$	=	temperatura del proceso
$T_m$	=	temperatura del material [=] $^\circ C$
$T_b$	=	temperatura del medio de temperatura controlada [=] $^\circ C$
$U$	=	coeficiente global de transferencia de calor [=] $J / m^2 \text{ } ^\circ C s$
$V_{emp}$	=	volumen de reactor empacado [=] $m^3$
$V_b$	=	velocidad del medio de temperatura controlada [=] $m / s$

### Letras Griegas

$\varepsilon$	=	fracción de espacios vacíos en el material a compostear [=] adimensional
$\varphi_e$	=	diámetro externo del reactor [=] m
$\varphi_m$	=	diámetro promedio de partícula del material a compostear [=] m
$\rho_a$	=	densidad del aire [=] kg / m <sup>3</sup>
$\rho_{ae}$	=	densidad del aire a la temperatura de entrada del reactor [=] kg aire / m <sup>3</sup> aire
$\rho_{as}$	=	densidad del aire a la temperatura de salida del reactor [=] kg aire / m <sup>3</sup> aire
$\rho_m$	=	densidad del material a compostear [=] kg material húmedo / m <sup>3</sup> de empaque
$\delta$	=	espesor de la pared del material del reactor [=] m
$\gamma_e$	=	fracción molar del agua a la entrada [=] kg agua / kg de aire
$\gamma_s$	=	racción molar de agua a la salida [=] kg agua / kg de aire
$\mu$	=	viscosidad del medio de temperatura controlada [=] Pa s
$\mu_a$	=	viscosidad del aire [=] Pa s

### Abreviaturas

<b>AGI</b>	:	corrida con medio de temperatura controlada agua isotérmico
<b>AGNI</b>	:	corrida con medio de temperatura controlada agua no isotérmico
<b>AINI</b>	:	corrida con medio de temperatura controlada aire no isotérmico
<b>Aw</b>	:	actividad de agua
<b>CDT</b>	:	control diferencial de temperatura
<b>m.s.v.i</b>	:	material seco volátil inicial
<b>%P.M.C</b>	:	porcentaje de pérdida del material a compostear
<b>vkgm</b>	:	unidad de volumen de aire necesario suministrar por kilogramo de material húmedo