



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**DINÁMICA MICROBIANA EN EL COMPOSTAJE DE
CACHAZA REACTIVADA CON GALLINAZA**

LOURDES ALEJANDRA ROMERO YAM

TESIS
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO
2013

La presente tesis, titulada: **Dinámica microbiana en el compostaje de cachaza reactivada con gallinaza**, realizada por la alumna: **Lourdes Alejandra Romero Yam**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

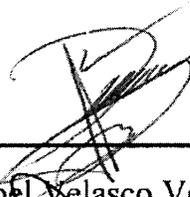
CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. Juan José Almaraz Suarez

Director:



Dr. Joel Velasco Velasco

Asesor:



Dr. Arturo Galvis Spinola

Asesor :



Dr. Francisco Gavi Reyes

Montecillo, Texcoco México. 13 septiembre de 2013

RESUMEN

DINÁMICA MICROBIANA EN EL COMPOSTAJE DE CACHAZA REACTIVADA CON GALLINAZA

Lourdes Alejandra Romero Yam, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

Se estudió la dinámica microbiana y el contenido de nitrógeno mineral y total durante el proceso de compostaje de cachaza reactivada con gallinaza. Se evaluaron cuatro tratamientos con diferentes proporciones de cachaza y gallinaza (10:0, 9:1, 7:3 y 5:5), en contenedores de 68 L durante 87 días. Las variables evaluadas fueron: temperatura, poblaciones de bacterias, hongos, microorganismos ligninolíticos, evolución de CO₂, nitrógeno total, amonio y nitratos. La adición de gallinaza a la cachaza almacenada, incrementó las poblaciones de bacterias, hongos y microorganismos ligninolíticos, estos grupos microbianos mostraron poblaciones de 9.9, 5.5 y 6.4 unidades logarítmicas (ULog), respectivamente. El tratamiento 5:5 presentó una disminución en NH₄⁺-N (de 947 a 268 mg kg⁻¹) y un aumento en NO₃⁻-N (de 2.7 a 483 mg kg⁻¹) y en nitrógeno total (3.4 a 4.7 %). Esta proporción de gallinaza y cachaza fue la mejor ya que es estable biológicamente (compost) y tiene el mayor contenido de nitrógeno total.

Palabras clave: ecología microbiana, lignocelulosa, biotransformación de cachaza, compost.

ABSTRACT
MICROBIAL DYNAMICS DURING COMPOSTING OF FILTER CAKE
REACTIVATED WITH POULTRY MANURE

Lourdes Alejandra Romero Yam, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

The microbial dynamic, mineral and total nitrogen content during the composting process of filter cake reactivated with chicken manure was studied . Four treatments with different proportions of filter cake and chicken manure (10:0, 9:1, 7:3 and 5:5) in 68 L containers for 87 days were tested. The evaluated variables were: temperature, total populations of bacteria, fungi, ligninolytic microorganisms, CO₂ evolution , total nitrogen, ammonium and nitrate. The addition of chicken manure to stored filter cake, increased populations of bacteria, fungi and ligninolytic microorganisms, these groups showed microbial populations 9.9, 5.5 and 6.4 log units (ULog), respectively. The 5:5 treatment showed a decrease in the NH₄⁺⁻N (from 947 to 268 mg kg⁻¹) and an increase in NO₃⁻-N (from 2.7 to 483 mg kg⁻¹) and total nitrogen (from 3.4 to 4.7%). This proportion of manure and filter cake was the best because it was biologically stable (compost) and had the highest content of total nitrogen.

Key words: microbial ecology, lignocellulose, biotransformation of filter cake, compost

“Todo lo que se hace por amor, se hace más allá del bien y del mal”
Friedrich Nietzsche

Este trabajo está dedicado a todos las personas que creen en mí y en especial a mi ángel de la guarda Irma Dolores Yam Gamboa⁺ y al ángel que Dios me dio para cuidar: Orlando Pacheco (alias Landini).

AGRADECIMIENTOS

A Dios por las bendiciones que siempre me ha dado de manera inmerecida.

A mi esposo Rodrigo Pacheco por creer en mí en los momentos de mayor adversidad. A Orlando, por ser paciente durante mis ausencias.

A mis padres que son un ejemplo de fortaleza y de dedicación, es un honor ser su hija; y a mis hermanas que día a día siguen poniendo en alto nuestro distintivo LARY y esto nos reta a ser mejores en todos los aspectos de la vida.

Al Dr. Almaraz por potencializar mis capacidades. Al Dr. Velasco por su apoyo incondicional para la terminación de este documento. Al Dr. Galvis por ayudarme a ver la luz a través de las espesas nubes del conocimiento y al Dr. Gavi por su tiempo y aportaciones. Muchas gracias a todos por su apoyo durante mi programa de maestría.

Al CONACYT por la beca otorgada durante el programa de maestría.

Al laboratorio de Microbiología del Colegio de Postgraduados. A los auxiliares del Laboratorio Lorenzo Viana, Fernando López, Edmundo Martínez, Manuel Solano Armando, Susie Martínez, Isela Torres, Cristina Heredia, Yadira Cornejo y Don Miguel porque este trabajo no lo hubiera podido realizar sin su apoyo desinteresado y sus consejos. Siempre les estaré agradecida a cada uno de ustedes y siempre los llevo en mi corazón.

Al departamento de documentación y biblioteca, que siempre me brindaron su apoyo en la búsqueda de información, especialmente a Don Mario Espejel que siempre estuvo al pendiente de todas mis solicitudes.

A mis amigos y compañeros de maestría Mariana Vázquez (y a su familia), Felipe Portela, Mariela Benitez, Eliceo Quisehuatl, Edgar Brito, Arturo Jiménez, Cid Aguilar, Isaura Escalante, José Luis García, entre otros por los momentos compartidos dentro y fuera del colegio así como lecciones de vida que aprendimos juntos.

A Cajeme, Rafa, Gero y Carlos por sus enseñanzas en las artes culinarias y por cuidarme como a una hermana.

A la segunda madre que Dios me mando Lisbhet Can, a su familia y sus hermanas por haberme dado cobijo y permitirme ser parte de sus familias durante mi estancia en Texcoco.

A mis amigos de Segundo Acto porque siempre son un gran apoyo moral para mí en todo lo que hago.

A la Unidad Experimental Marista por brindarme un espacio para concluir este trabajar, en especial a Alfonso Cuevas, porque siempre eres parte mi crecimiento académico y humano.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1 Objetivo General	4
2.1.1 Objetivos específicos	4
2.2 Hipótesis general.....	5
2.2.1 Hipótesis específicas	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1 Importancia y características de los materiales a utilizar	6
3.2 Compostaje	8
3.3 Fases del compostaje.....	10
3.4 Microbiología del compostaje.....	11
3.5 Evolución del nitrógeno	16
4. MATERIALES Y MÉTODOS	19
4.1 Localización del sitio	19
4.2 Origen y contenido del material utilizado.....	19
4.3 Establecimiento del experimento	19
4.4 Diseño experimental	21
4.5 Variables de estudio.....	21
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1 Temperatura	24
5.2 Poblaciones microbianas.....	26
5.3 Evolución del nitrógeno durante el proceso de compostaje.....	29
5.4 Respiración	32
5.5 Relación C:N.....	33
6. CONCLUSIONES	35
7. LITERATURA CITADA	36
8. ANEXOS	46

ANEXO I. Análisis de varianza..... 46

ANEXO II. Cuadros de comparación de medias. 57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características físico-químicas de la cachaza	7
Cuadro 2. Análisis químico de los materiales al inicio del compostaje.....	20
Cuadro 3. Valores finales de materia orgánica, carbono total, nitrógeno total y relación C:N del compost obtenido en los diferentes tratamientos de mezclas de cachaza y gallinaza.	34
Cuadro A 1. Análisis de varianza para las bacterias totales para el muestreo a los 10 días.....	46
Cuadro A 2. Análisis de varianza para las bacterias totales para el muestreo a los 24 días.	46
Cuadro A 3. Análisis de varianza para las bacterias totales en el muestreo a los 45 días.	47
Cuadro A 4. Análisis de varianza para las bacterias totales en el muestreo a los 73 días.	47
Cuadro A 5. Análisis de varianza para las bacterias totales en el muestreo a los 87 días.	48
Cuadro A 6. Análisis de varianza para los hongos totales a los 10 días.	48
Cuadro A 7. Análisis de varianza para los hongos totales a los 24 días.	49
Cuadro A 8. Análisis de varianza para los hongos totales a los 45 días.	49
Cuadro A 9. Análisis de varianza para los hongos totales a los 73 días.	50
Cuadro A 10. Análisis de varianza para los hongos totales a los 87 días.	50
Cuadro A 11. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 10 días.....	51
Cuadro A 12. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 24 días.	51
Cuadro A 13. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 45 días.....	52
Cuadro A 14. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 73 días.	52
Cuadro A 15. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 87 días.	53
Cuadro A 16. Análisis de varianza para el nitrógeno total a los 45 días.	53
Cuadro A 17. Análisis de varianza para el nitrógeno total a los 87 días.	54

Cuadro A 18. Análisis de varianza para el amonio a los 45 días.....	54
Cuadro A 19. Análisis de varianza para el amonio a los 87 días.....	55
Cuadro A 20. Análisis de varianza para nitratos a los 45 días.....	55
Cuadro A 21. Análisis de varianza para nitratos a los 87 días.....	56
Cuadro A 22. Poblaciones de bacterias totales en ULog.....	57
Cuadro A 23. Poblaciones fúngicas durante el proceso de compostaje.....	57
Cuadro A 24. Poblaciones de microorganismos ligninolíticos durante el proceso de compostaje.....	57
Cuadro A 25. Comparación de medias para el nitrógeno total.....	57
Cuadro A 26. Comparación de medias para el amonio.....	58
Cuadro A 27. Comparación de medias para el nitratos.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento de los microorganismos en las diferentes fases del proceso de compostaje (Day y Shaw, 2005).	15
Figura 2. Crecimiento de las poblaciones totales de bacterias, actinomicetos y hongos durante el proceso de compostaje (Day y Shaw, 2005).	15
Figura 3. Establecimiento de los tratamientos en el módulo de vermicompostaje del Área de Microbiología de Microbiología del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.	21
Figura 4. Temperatura ambiental durante el proceso de compostaje.....	25
Figura 5. Temperatura durante el proceso de compostaje de los diversos tratamientos.	25
Figura 6. Dinámica de crecimiento de bacterias (A), hongos (B) y microorganismos ligninolíticos (C) durante el proceso de compostaje de mezclas de cachaza y gallinaza.	28
Figura 7. Cambios en el % de Nitrógeno Total (A) y en las fracciones minerales de nitrógeno de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (B) y $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (C) para los cuatro tratamientos de cachaza y gallinaza.....	31
Figura 8. Emisiones de CO_2 en el proceso de compostaje de cachaza reactivada con gallinaza.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En el continente americano, en el año 2010, se produjo el 56% de la caña de azúcar del mundo (FAO, 2012). México ocupa el quinto lugar mundial en producción, y el volumen de la producción de azúcar esperada para la zafra 2011-2012 que se realizó en 54 de 57 ingenios, en una superficie de 716,890 ha, alcanzó una producción de 5,098,901 toneladas (CONADESUCA, 2012) con un valor cercano a los 27 mil millones de pesos, aportando 11.6% del producto interno bruto (PIB) del sector primario y 2.5% del PIB manufacturero (Secretaría de Economía, 2012). Esta agroindustria genera diversos residuos, pero los generados en mayores volúmenes son el bagazo (25 a 30%) y la cachaza (3 a 5%). El primero es considerado un “subproducto” más que un residuo, debido al amplio uso que tiene en la industria azucarera y en otras industrias agropecuarias. El segundo generalmente es almacenado a las afueras de los ingenios azucareros, lo que deriva en múltiples problemas ambientales (Velasco-Velasco *et al.*, 2004; Basanta *et al.*, 2007). La cachaza es un material orgánico esponjoso, de color pardo oscuro a negro, proveniente de la filtración y lavado de los sedimentos en el proceso de clarificación de los jugos de la caña (Zérega 1993; Arreola-Enriquez *et al.*, 2004), presentando un contenido de humedad del 70 – 80%. De manera general la cachaza contiene de 0.79 – 2.2% de nitrógeno y alcanza una relación C:N de entre 12.4 a 30 (Venegas-González *et al.*, 2005; Rasul *et al.*, 2008; Ochoa *et al.*, 2010; García-Torres *et al.*, 2011).

La cachaza tiene la capacidad de mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo e incrementa de manera temporal la capacidad de intercambio catiónico (CIC), también favorece la retención de humedad (Hernández *et al.*, 2008). Sin embargo, el uso de este residuo para fines agrícolas presenta ciertas dificultades como son el

manejo, transporte y almacenamiento, esto debido a su contenido de humedad. Se ha reportado que la aplicación de material orgánico fresco genera daños a los cultivos debido al proceso de descomposición, por esto, varios autores sugieren que previo a su aplicación en campo dicho material pase por un proceso de descomposición como lo es el compostaje (Sánchez *et al.*, 2005; Meunchang *et al.*, 2005; Ochoa *et al.*, 2010). Otro problema que presenta la cachaza son las grandes áreas que necesita la industria para su almacenamiento, además de que genera mal olor y, en muchas ocasiones, es un foco de infección.

La alternativa que diversos autores sugieren, para dar un mejor manejo a la cachaza es el compostaje, el cual es un proceso bio-oxidativo que permite la estabilización del material. El compostaje se puede facilitar apilando dicho material y, dando condiciones adecuadas de aireación y humedad que permitan a los microorganismos nativos crecer y degradar las estructuras que componen los materiales vegetales (hemicelulosa, celulosa y lignina). Las condiciones que se van generando a lo largo del proceso de compostaje han sido ampliamente descritas en cuatro fases, las cuales tienen como principal indicador la temperatura: 1) mesófila inicial (10-42°C), 2) termófila (45-70°C), 3) enfriamiento o mesófila final (65-50°C), 4), y madurez (50-23°C). Cada fase presenta características particulares en torno a los factores que intervienen (temperatura, humedad, CO₂, relación C:N, pH), los cuales permiten o inhiben el desarrollo de ciertas poblaciones microbianas (Bernal *et al.*, 2009; Bonito *et al.*, 2010). La diferencia de combinaciones de componentes lignocelulíticos de los materiales orgánicos y la diversidad de condiciones en las que se pueden realizar compostas no ha permitido esclarecer cómo diferentes factores bióticos y abióticos afectan la actividad de las poblaciones microbianas, esto se observa en los resultados de muchos trabajos. Es fundamental comprender como diversos

factores regulan la actividad de las poblaciones microbianas en el proceso de compostaje, ya que estos organismos pueden proveer información para evaluar el proceso, la calidad, la velocidad de degradación y finalmente la madurez del producto (Vargas-Garcia *et al.*, 2005; Chroni *et al.*, 2009).

En el manejo del proceso de compostaje se vuelve de suma importancia la dinámica de la relación carbono:nitrógeno en concordancia con la actividad microbiana. El nitrógeno ha tenido una especial atención durante el proceso de mineralización durante el compostaje y concretamente en los procesos de nitrificación y desnitrificación del amonio y nitratos, respectivamente. Un manejo ineficiente durante el proceso de compostaje promueve pérdidas de nitrógeno vía volatilización del amoniaco y óxido nitroso, y la lixiviación de nitratos. Además afecta el valor nutrimental final del compost y por ende su valor económico (Tiquia, 2002; Bernal *et al.*, 2009; Velasco-Velasco *et al.*, 2011). Así, un mejor entendimiento de los factores y procesos microbianos que intervienen durante el compostaje es esencial.

Con base en lo anterior en la presente investigación se evaluó la dinámica de las poblaciones de bacterias, hongos y microorganismos ligninolíticos durante el proceso de compostaje de cachaza reactivada con gallinaza en diferentes proporciones y se cuantificó la evolución del nitrógeno total, amonio y nitratos.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo General

Estudiar las poblaciones microbianas, y la evolución del nitrógeno durante el proceso de compostaje de cachaza reactivada con gallinaza.

2.1.1 Objetivos específicos

- Estudiar la dinámica microbiana del compostaje de cachaza reactivada con gallinaza.
- Obtener compostas con un contenido de nitrógeno total mayor a 2.5 % usando como sustrato base cachaza con la adición de diferentes cantidades de gallinaza.
- Describir la evolución del nitrógeno y la respiración microbiana durante el compostaje de cachaza.

2.2 Hipótesis general

El compost hecho de cachaza mezclado con aplicación de gallinaza incrementa el contenido de nitrógeno y la carga microbiana en el producto final.

2.2.1 Hipótesis específicas

- Los diferentes niveles de gallinaza adicionados a la cachaza afectan la dinámica de las poblaciones de microorganismos durante el compostaje.
- A mayor cantidad de gallinaza adicionada mayor contenido de nitrógeno total al final del compostaje.
- Mayor cantidad de gallinaza adicionada a la cachaza incrementa la respiración microbiana y resulta en cambios en los niveles de nitratos y amonio durante el compostaje.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Importancia y características de los materiales a utilizar

En México, el cultivo de caña de azúcar abarca una superficie de 716,890 mil hectáreas, en las cuales se cosechan 45 millones de toneladas anuales de caña, abasteciendo 62 ingenios, el 20 % de estos se ubican en un radio de 50 km del Campus Córdoba del Colegio de Postgraduados (CONADESUCA, 2012). Hernández (2007) reporta que en el proceso de extracción de la azúcar se liberan en promedio 8 m³ de agua de lavado, 156 L de vinaza, 250 kg de bagazo y 30 kg de cachaza por tonelada de caña molida. Algunos de estos residuos, entre ellos la cachaza, son potencialmente utilizables como enmiendas orgánicas para recuperar la pérdida de materia orgánica en particular y la fertilidad de los suelos cañeros en general (Sánchez *et al.*, 2005). Tan solo en México se producen 1000000 t al año de cachaza (Salgado *et al.*, 2000). Las grandes cantidades acumuladas de desecho en los ingenios producen gases que afectan la calidad del ambiente y causa proliferación de insectos y roedores que pueden llegar a ser focos de infección de enfermedades (Arreola-Enríquez, 2004; Velarde *et al.*, 2004).

La cachaza, también conocida como torta de filtro, se obtiene en la clarificación que se hace al jugo de caña, recolectada a la salida de los filtros de vacío. Es de consistencia esponjosa, de color oscuro, puede tener hasta 75% de humedad (Velarde *et al.*, 2004; Basanta *et al.*, 2007). En lo que respecta a las concentraciones de nutrientes, estos varían de acuerdo a la región, al sistema de producción, a la variedad de la caña y a la tecnología utilizada en el proceso de extracción de la azúcar (Zerega, 1993) (Cuadro 1). El calcio, varía debido a que en el proceso de la clarificación del jugo se utiliza cal, generalmente en altas cantidades. El potasio, es uno de los

nutrientes que no son altos en este residuo debido a la solubilidad que presenta este elemento (Basanta *et al.*, 2007).

En el Cuadro 1 Características físico-químicas de la cachaza que se han reportado en algunos trabajos sobre su uso como enmienda en el suelo. Estos sugieren alta variación en el contenido de nutrimentos del material, por ejemplo N muestra un rango de 0.88 a 2.4%; lo cual representa un área de oportunidad para realizar investigación.

Cuadro 1 Características físico-químicas de la cachaza

H	pH	C:N	M.O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na	CaO	MgO	Fuente
%			%	%	%	%	%	%	%	
70	--	--	--	0.88	1.11	0.18	--	--	--	(Salgado <i>et al.</i> , 2000)
75	--	29	--	1.60	1.20	0.40	--	--	--	(Velarde <i>et al.</i> , 2004)
--	--	20	40	1.70	3.00	0.42	--	--	1.07	(Basanta <i>et al.</i> , 2007)
--	7.2	13	--	2.40	3.80	0.85	--	12.7	--	(Sangwan <i>et al.</i> , 2009)

Investigaciones sobre la aplicación de cachaza al suelo reportan que esta tiene la capacidad de mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas, y de incrementar de manera temporal la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y retiene humedad (Velarde *et al.*, 2004; Hernández *et al.*, 2008). Para lograr dichos efectos positivos, la cachaza requiere un proceso de estabilización previo a su aplicación como abono orgánico, ya que su aplicación al

suelo en estado fresco incrementa la temperatura (debido a la bio-oxidación aerobia y anaerobia del material), que genera daños a las plantas y los organismos del suelo (Sánchez *et al.*, 2005).

De igual forma, la producción de gallinaza en sistemas de producción avícola intensiva es potencialmente un problema ambiental si no se le da un correcto manejo, pudiendo ser una alternativa su aplicación como abono orgánico. La composición de este material está determinado principalmente por la dieta y el sistema de alojamiento de las aves. Se estima que la producción de gallinaza pura y seca depende del peso vivo y de su consumo total encontrándose entre 20 y 28 kg/ave (Estrada, 2005). Su contenido nutrimental es de 0.87 % N, 1.84 % P y 0.81 % de K (Salgado *et al.*, 2000).

3.2 Compostaje

El compostaje es un método para producir material pre-humificado fácilmente mineralizable y con alta biomasa microbiana (Labrador, 1996), es decir, es un proceso de biooxidación donde los residuos orgánicos generalmente compuestos de moléculas orgánicas complejas (celulosas, hemicelulosas y ligninas) se descomponen en compuestos orgánicos más simples que resulta en un aumento en el contenido de nutrimentos que pueden ser más fácilmente asimilables por las plantas (Velasco-Velasco, 2002). En el desarrollo del compostaje se deben manejar ciertas variables como son: humedad, oxígeno, relación C:N, tamaño de partícula y pH para una descomposición microbiana aerobia (Brady y Weil, 2008). El compost es el equivalente al humus que se produce naturalmente, resultado de la descomposición controlada de la materia orgánica (Velarde *et al.*, 2004). El compostaje es una opción de estabilización microbiana de la cachaza; aunque se requiere más investigación sobre la dinámica de los nutrimentos durante el proceso con la finalidad de obtener un producto con mayor concentración de nutrientes y de

materia orgánica para que sea una buena opción al uso de fertilizantes nitrogenados.

Durante el desarrollo del compostaje existen factores determinantes tales como contenido de agua, temperatura y relación C:N. La temperatura es el indicador de las fases dentro del proceso, que permite el desarrollo de cierto grupo de microorganismos encargados de degradar la materia orgánica.

Cuando se instala la pila de compostaje el desarrollo de comunidades microbianas comienza a generar calor al ir descomponiendo el material orgánico. La manera en que la temperatura se desarrolla a lo largo del proceso hace que sea el factor que mejor describa el proceso de compostaje, ya que pequeñas variaciones de esta afectan la actividad microbiana más que otros factores, es por esto, que la temperatura se considera la variable fundamental en el control del compostaje (Liang *et al.*, 2003; Miyatake y Iwabuchi, 2006; Bueno y Díaz, 2008).

Los microorganismos mesófilos se desarrollan a 15 – 40 °C y termófilos 40 – 70 °C (Bueno y Díaz, 2008). La temperatura se debe controlar según los fines del compost (Saludase *et al.*, 2007; Poulsen, 2010). La temperatura máxima en la pila, debe ser adecuada a los fines del compostaje: temperaturas mayores de 55°C para sanidad, 44 – 55 °C para máxima degradación y 35 – 40 °C para máxima diversidad microbiana (Saludase *et al.*, 2007).

A temperaturas mesófilas (37 °C) la pila de compostaje muestra una alta actividad microbiana, probablemente debido a la degradación de componentes orgánicos complejos (Saludase *et al.*, 2007).

Las pilas de compostaje que se mantienen a temperaturas termófilas (55 °C) promueven la rápida degradación de la materia orgánica debido a que los organismos termotolerantes y termófilos atacan rápidamente los componentes orgánicos, y posteriormente la actividad

microbiana comienza a disminuir. Este tipo de compostaje es benéfico para una rápida inactivación de microorganismos patógenos y semillas de malezas (Saludase *et al.*, 2007).

El control y monitoreo de la temperatura se vuelve un factor imprescindible para comprender el proceso de compostaje. El parámetro más significativo que puede ser utilizado en el control de la temperatura es la tasa de flujo y la temperatura de entrada de aire, la presión y la ventilación, la duración de una evento de ventilación, y la tasa de adición de agua (Ekinci *et al.*, 2006; Papadimitrio *et al.*, 2010).

3.3 Fases del compostaje

Por las características que se presentan en cualquier pila de compostaje, independientemente del material con el que se realice, siempre se observaran ciertas fases. Existe debate sobre la cantidad de fases, algunos consideran que son 3 fases y otros consideran que son 4. En esta revisión se consideraran 4 fases: mesófila inicial, termófila, mesófila final y maduración, estas fases están determinadas principalmente por la temperatura y esta determinará los grupos microbianos presentes en cada fase.

La primera fase (mesófila) comienza con la formación de la pila de compostaje y la duración de esta depende del material. Esta primera fase se caracteriza por durar pocas horas o días. A diferencia a de la fase termófila que se mantiene por un período más largo, que dura días o meses. La fase fría y de maduración aunque son muy difíciles de diferenciar toman meses (Tuomela *et al.*, 2000).

La fase inicial del compostaje es considerada la más dinámica, se caracteriza por un rápido aumento de temperatura, cambios en el pH, y la degradación de componentes orgánicos simples (Danon *et al.*, 2008). En la fase termófila se alcanza la temperatura máxima, comienza a

disminuir el pH y aumenta la degradación de los componentes más complejos, estas características de temperatura proporcionan la menor diversidad de microorganismos.

En la fase mesófila final, también conocida como la fase enfriamiento, la temperatura es más estable y será la más baja de todo el proceso. Esta fase se caracteriza por presentarse un pH cercano a la neutralidad, y da paso a la última fase que es la maduración, que es el estado deseable al que debe llevarse el proceso de degradación de la materia orgánica (Danon *et al.*, 2008).

El compostaje que se realiza actualmente a gran escala se lleva a cabo picando en fracciones muy pequeñas el material y colocándolo en hileras muy largas. Este proceso se caracteriza por las 4 fases: (1) la mesófila inicial (10-42 °C) en el cual la temperatura crece rápidamente, (2) la fase termófila (45 – 70 °C) que se distingue por una prolongada alta temperatura, (3) la fase mesófila final (65 – 50 °C) es el momento en el que decrece la temperatura y la fase final que es la maduración (50 – 23 °C) (Bonito *et al.*, 2010).

3.4 Microbiología del compostaje

La pila de compostaje vista como un ecosistema se encuentra constituida principalmente por bacterias, actinomicetos y hongos, que a manera de sucesión degradan la materia orgánica. La abundancia de los microorganismos depende de las condiciones nutricionales y ambientales de la pila que se ven modificados por la misma actividad de los microorganismos (pH, relación C:N, temperatura, oxígeno, entre otros) y dicha actividad permite subdividir el proceso del compostaje en las 4 etapas, arriba mencionadas (Tuomela *et al.*, 2000; Moreno y Mormeneo, 2008).

La sucesión microbiana se puede explicar a través de las fases, ya que se encuentra

íntimamente relacionada con la temperatura. La primera fase está dominada básicamente por bacterias, los hongos se encuentran en todo el proceso pero predominan a niveles por debajo de 35 % de agua y se inactivan a temperaturas mayores de 60°C (Bernal *et al.*, 2009).

Al inicio del compostaje predominan las bacterias mesófilas, pero después, conforme aumenta la temperatura sobre los 40 °C, las bacterias termófilas aumentan y aparecen los hongos. Cuando la temperatura excede los 60 °C, la actividad microbiana se ve disminuida en especial la fúngica; cuando la temperatura comienza a descender las poblaciones de bacterias mesófilas y actinomicetos aumentan (Tuomela *et al.*, 2000).

Las bacterias dominan durante el proceso termófilo, mientras que los hongos, Streptomycetes y las levaduras se han detectado en las fases inicial y final. Diferentes poblaciones bacterianas son encontradas en la etapa mesófila y termófila. Durante el pico alto de calor se han detectado bacterias de tipo *bacillus*; sin embargo, en las fases frías y en la maduración han sido encontradas bacterias tanto gram positivas como gram negativas (Danon *et al.*, 2008).

Cuando se mantiene la fase termófila se ha demostrado que se pueden obtener mejores resultados en el compostaje ya que esto genera una mayor estabilidad y un acortamiento del proceso (Xiao *et al.*, 2011).

Las bacterias es el grupo de microorganismos que genera entre el 80 – 90% de la actividad microbiana en el compostaje, es decir, las bacterias son las principales responsables de la degradación. Su menor tamaño que los hongos les permite tener una alta relación superficie/volumen que promueve una rápida transferencia de substratos solubles dentro de la célula. Es por esto que las bacterias son más dominantes que otros grupos microbianos como los

hongos. Algunas bacterias, como es el caso de *Bacillus* spp., poseen paredes gruesas por lo que son muy resistentes al calor, radiación y a desinfecciones químicas (Tuomela *et al.*, 2000). Tanto la abundancia y la diversidad de bacterias dependerán del tipo de material que sea utilizado en la pila de compostaje (Day y Shaw, 2005; Moreno y Mormeneo, 2008).

Los hongos (del latín *fungus*), son organismos heterótrofos carentes de clorofila. Las células de los hongos poseen un núcleo diferenciado y en muchas de ellas se produce esporulación, son notablemente diferentes a las bacterias. Son el segundo componente más abundante en el suelo, están constituidos por estructuras filamentosas llamadas hifas que en conjunto forman el micelio (Varela y Amora, 2007). Presentan en común con las plantas paredes celulares así como la incapacidad de moverse. Crecen en condiciones aeróbicas (Hans y Zaborosch, 1997). En el compostaje los hongos trabajan casi a la par que los actinomicetos.

Los hongos son quienes dominan la descomposición en el suelo. En el compostaje su abundancia es menor que las bacterias, pero no por esto su relevancia en el proceso de biodegradación y la conversión de la materia orgánica es menor. Esto se debe a las altas temperaturas que se generan sobre todo en la fase termófila ya que temperaturas mayores de 65 °C son muy extremas para organismos eucariotas (Bonito *et al.*, 2010).

El factor principal que permite o limita el desarrollo de los hongos en el compostaje es la temperatura. Otros factores importantes son la fuente de carbono y nitrógeno, así como el pH. Una cantidad moderadamente alta de nitrógeno es necesaria para el crecimiento de los hongos, aunque algunos hongos, principalmente los hongos de la pudrición de la madera, crecen a niveles de nitrógeno bajos. De hecho un prerrequisito para la degradación de la lignina es un bajo contenido de nitrógeno. Sin embargo, un nivel bajo de nitrógeno es un factor limitante de la

velocidad de la degradación de celulosa. La mayoría de los hongos prefieren ambientes ácidos a pesar de que toleran un amplio rango de pH, a excepción de *Basidiomycotina* que disminuye su crecimiento sobre pH de 7.5 (Tuomela *et al.*, 2000).

Los hongos tienen una alta capacidad degradadora, dentro de estos los más efectivos degradadores de la lignina son los que pertenecen a *Basidiomycotina* y estos en su mayoría son mesófilos. Sin embargo, pocos son los *Basidiomycotina* que crecen a altas temperaturas. Dentro de los hongos termófilos reportados con mayor frecuencia se encuentran: *Phanerochaete chrysosporium* que es un hongo de la pudrición blanca, que tiene un óptimo de temperatura entre 36 °C y 40 °C y máximo de temperatura de 46 – 49 °C; *Ganoderma colossum* es otro hongo de la pudrición blanca que tiene la capacidad de crecer a 45 °C y su óptimo es de 40 °C. El género *Coprinus* tiene como óptimo de temperatura 40 °C (Tuomela *et al.*, 2000; Grint *et al.*, 2007).

Los microorganismos que conforman la biomasa son los responsables de la transformación de los materiales orgánicos en el suelo (Arreola, 2001). El compostaje está basado prácticamente en la acción de dicha biomasa microbiana y su actividad definirá el comportamiento de la temperatura y humedad (Bueno y Díaz., 2008).

Los principales microorganismos responsables del proceso de compostaje son hongos, actinomicetos y bacterias. En la cinética que estos microorganismos siguen durante el compostaje, el primer nivel lo ocupan las bacterias, actinomicetos y hongos, estas son los grandes grupos microbianos que realizan la descomposición (Figuras 1 y 2). El segundo nivel lo ocupan los protozoos y el último nivel de consumidores son macroorganismos tales como: quilópodos y coleópteros. Este nivel captura el segundo nivel de consumidores (Day y Shaw, 2005).

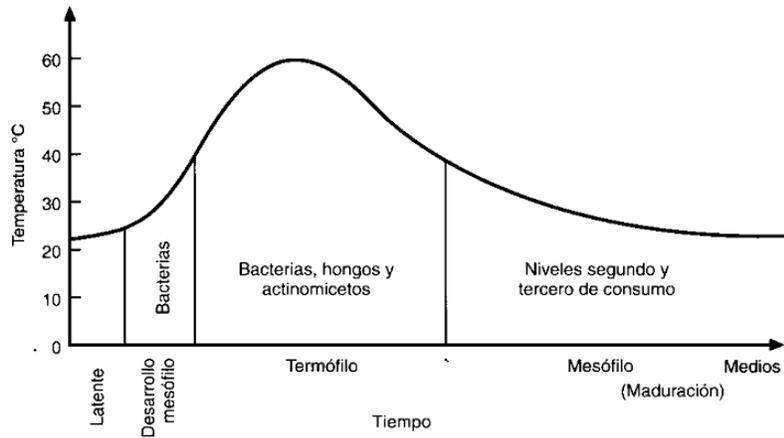


Figura 1. Crecimiento de los microorganismos en las diferentes fases del proceso de compostaje (Day y Shaw, 2005).

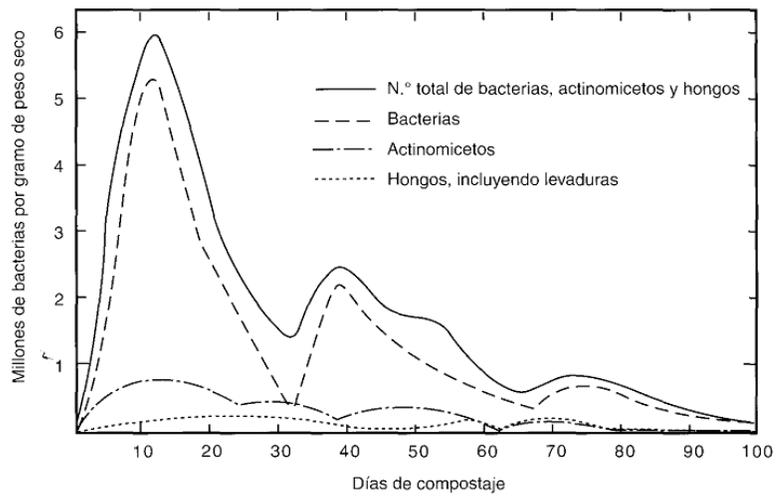


Figura 2. Crecimiento de las poblaciones totales de bacterias, actinomicetos y hongos durante el proceso de compostaje (Day y Shaw, 2005).

La cachaza es un residuo sólido de caña que es fácil de descomponer debido al tamaño de sus partículas (Velarde *et al.*, 2004). Basanta *et al.* (2007) reporta que el compost de cachaza aumenta la disponibilidad del N al aplicarlo al suelo. Hernández *et al.* (2008) indica algunas características del compost de cachaza son: pH de 7.8, C.E. 2.5 dm⁻¹, M.O 29.8 %, N 1.6%, P 411 Cmol c+ kg⁻¹, y Ca 56.4 Cmol c+ kg⁻¹.

Sánchez (2009) observó poblaciones bacterianas mesófilas de 9.4×10^5 ufc g⁻¹, termófilas de 1.6×10^5 ufc g⁻¹ y celulolíticas de 4×10^4 NMP g⁻¹ en compostas de mezclas de 70 % de cachaza, 15 % de bagazo, 10 % de tierra de molino y 5 % de cenizas durante 90 días de proceso.

3.5 Evolución del nitrógeno

El nitrógeno es uno de los tres elementos esenciales que las plantas cultivadas requieren en mayor cantidad, por esto se vuelve necesario abastecer al suelo de este nutrimento extraído en las cosechas (Almaraz y Ferrera-Cerrato, 2007). En su transformación y transporte, el N inorgánico se puede perder por diferentes eventos como: volatilización (amoníaco), mineralización (nitrógeno orgánico a inorgánico), adsorción de amonio por la arcilla, inmovilización biológica (microorganismos que incorporan N en sus protoplasma), extracción por la planta (absorción de nitratos y nitritos), desnitrificación (pérdida de N en forma de óxido nitroso), lixiviación de nitratos y amonio en el perfil del suelo (Estrada-Botello *et al.*, 2002). En el compostaje se dan las primeras dos formas de transformación y transporte. La volatilización de N reduce la fertilidad de los abonos orgánicos y se vuelve una pérdida económica (Barrington *et al.*, 2002).

Durante el proceso de compostaje el N ha sido ampliamente estudiado, diversos autores coinciden en que la concentración del N aumenta de manera progresiva, esto es debido al proceso de mineralización de los componentes orgánicos. De tal forma que el amonio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) disminuye de manera progresiva durante el proceso. En el caso de la formación del NO_3^- , este aumenta cuando la temperatura cae por debajo de los valores termófilos ($40\text{ }^\circ\text{C}$); la intensidad del proceso va a depender de la cantidad de NH_4^+ disponible para la nitrificación bacteriana (Bernal *et al.*, 1996; Tiquia, 2002; Bernal *et al.*, 2009)

Las concentraciones de CO_2 se encuentran relacionadas con la temperatura que alcanzan las pilas de compostaje, esto debido a que el proceso de degradación fracciona las fuentes de carbono. La descomposición en el proceso de compostaje evoluciona debido a las pérdidas de carbono, principalmente en forma de CO_2 como producto metabólico, el contenido de carbono del material composteable disminuye en el tiempo y el contenido de N por unidad de material aumenta, dando lugar a la disminución de la relación entre el carbono y el nitrógeno (C:N) (Raj y Antil, 2011).

Los microorganismos requieren una fuente de carbono y macronutrientes como el N, P, K y elementos traza para su desarrollo. El carbono es la fuente principal de energía para los microorganismos y una pequeña fracción de éste se almacena en sus paredes celulares. Parte de este carbono es utilizado como energía por los microorganismos, y el resto es liberado en forma de calor. El nitrógeno es un elemento crítico para los microorganismos porque es componente de las proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas y co-enzimas necesarias para el crecimiento celular y funcionamiento. Si el nitrógeno es una limitante durante el compostaje el proceso será lento. En contraste, si hay un exceso habrá pérdidas en forma de amonio gaseoso

(Tuomela *et al.*, 2000; Bernal *et al.*, 2009).

Para un correcto compostaje se busca mantener la mayor cantidad de N manteniendo una cantidad de C adecuada. Los microorganismos utilizan 30 partes de C por cada una de N, es por esto, que la relación óptima se encuentra entre 25- 40 (Tuomela *et al.*, 2000; Bueno y Díaz, 2008; Bernal *et al.*, 2009).

Esta relación C: N influye en la velocidad con la que se degradará el material y con la pérdida de amonio durante el compostaje. Si esta relación es mayor a 40 la actividad biológica se ve diezmada ya que el nivel de N se vuelve insuficiente para el crecimiento de los microorganismos. Para disminuir el exceso de C aparecen ciertos microorganismos, al morir estos el N que se encuentra incorporado en su biomasa queda disponible para otros microorganismos, y de esta manera la relación C: N disminuye. Si la relación C: N es baja el compostaje es más rápido, pero el N que se encuentran en exceso se volatiliza en forma de amoniaco (Bueno y Díaz, 2008).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización del sitio

La investigación se realizó en el módulo de vermicompostaje del Área de Microbiología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, estado de México. El tipo de clima en el sitio es Cw, templado, subhúmedo con lluvias en verano (García, 2005).

4.2 Origen y contenido del material utilizado

Para la elaboración de los tratamientos la gallinaza se obtuvo de una explotación avícola que se encuentra ubicada en Córdoba, Veracruz, México. La cachaza se adquirió del ingenio “Potrero” ubicado en el municipio de Atoyac, Veracruz. La cachaza utilizada tenía cinco meses de encontrarse acumulada. Los análisis químicos de la materia prima se realizaron en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Postgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo (Cuadro 2).

4.3 Establecimiento del experimento

La unidad experimental consistió en un contenedor plástico con tapa, con capacidad de 68 L con medidas de 59.7 cm de largo x 46.7cm de ancho x 41cm de alto, dentro del cual se colocaron 50 kg (base fresca) de la mezcla de cachaza con gallinaza de acuerdo a la proporción que le correspondía (Figura 3). Dichas mezclas se airearon mediante volteos a los 7, 24, 30 y 79 días después de instalado el experimento. En cada volteo se adicionó agua, para mantener 65 % de agua en el sustrato durante un periodo de 87 días de compostaje (Radulovich, 2009).

Cuadro 2. Análisis químico de los materiales al inicio del compostaje

Variable	Cachaza	Gallinaza
pH	6.9	6.9
Conductividad Eléctrica (dSm ⁻¹)	0.8	18.4
Nitrógeno (%)	1.0	5.9
Materia Orgánica (%)	39.6	51.0
Carbono orgánico (%)	23.3	29.5
Relación C:N	21.0	5.0
Porcentaje de humedad (%)	60	88.5
Calcio (%)	2.5	2.5
Magnesio (%)	0.3	0.6
Potasio (%)	0.2	3.2
Fósforo (%)	1.0	1.3
Azufre (%)	0.1	0.6
Sodio (%)	0.01	0.45
Cobre (mg kg ⁻¹)	55.1	87.3
Manganeso (mg kg ⁻¹)	1.2	0.7
Fierro (mg kg ⁻¹)	24.1	0.8
Zinc (mg kg ⁻¹)	125.05	492.26



Figura 3. Establecimiento de los tratamientos en el módulo de vermicompostaje del Área de Microbiología de Microbiología del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

4.4 Diseño experimental

El experimento se realizó empleando un diseño completamente al azar con 3 repeticiones. Se evaluaron cuatro tratamientos: 100% cachaza y 0% gallinaza (10:0); 90% de cachaza y 10% de gallinaza (9:1); 70% cachaza y 30% gallinaza (7:3); 50% cachaza con 50% gallinaza (5:5). La instalación del experimento se realizó el día 28 Octubre del 2011, los muestreos se realizaron a los 12, 26, 47, 75 y 87 días después de establecido el experimento; en cada muestreo se tomaron tres submuestras de aproximadamente 40 g de composta a 25, 15 y 5 cm de profundidad. Las tres submuestras se mezclaron para obtener una muestra compuesta.

4.5 Variables de estudio

Se utilizó la técnica de diluciones y conteo en placa para determinar el número de microorganismos presentes en los tratamientos de estudio. Se tomaron 10 g de la muestra y se

mezcló en 90 mL de agua destilada estéril, con lo cual se obtuvo la dilución 10^{-1} , a partir de esta se realizaron las siguientes diluciones decimales hasta 10^{-6} . De cada dilución seriada se tomaron 100 μL y se depositaron en cajas Petri, distribuyendo homogéneamente la alícuota (Robert, 1990). Las variables microbiológicas evaluadas fueron: Bacterias Totales (BT) en el medio de cultivo agar nutritivo (Wollum, 1982), Hongos Totales (HT) en el medio papa dextrosa agar (Wollum, 1982) y microorganismos ligninolíticos en el medio sugerido por Subba Rao (1992) que contiene ácido tánico y extracto de malta. Las cajas se incubaron a $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 3 a 7 días y se contaron las colonias crecidas (Clark, 1965).

La temperatura se midió con termómetros de mercurio tres veces por semana durante la mañana. La temperatura se tomó en la parte central de las unidades experimentales. La temperatura ambiental se midió con una micro estación marca Whatch Dog Serie 1000 modelo 1425, este equipo tomó la temperatura ambiental cada hora durante los 87 días que duró el experimento.

El pH y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron suspendiendo la muestra en agua en proporción 1:5. El Nitrógeno Total (NT) se analizó por el método Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982). El $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y NO_3^-N con la solución de KCl 2M usando el método de destilación micro-Kjeldahl (Hesse, 1971). La materia orgánica se analizó con base en el método de Walkley y Black (1934). El calcio, magnesio, potasio, fósforo, azufre, sodio, cobre, manganeso, hierro, zinc y boro se solubilizaron mediante la digestión de la composta en 9 mL de ácido nítrico y ya en solución se cuantificaron mediante espectroscopía de emisión de plasma por acoplamiento inductivo modelo Optima 5300DV marca Perkin Elmer.

Los análisis de nitrógeno total, amonio y nitratos fueron de muestras compuestas

colectadas los días 10, 24 y 73 después de establecido el experimento. Y para los días 45 y 87 se analizaron muestras individuales de cada repetición.

La respiración microbiana se cuantificó utilizando un medidor portátil marca Spectrum technologies, Inc. (Plainfield, IL) modelo Telaire® 7001 con una precisión de ± 50 ppm y con una resolución de ± 1 ppm. La temperatura ambiental se tomó de manera continua con la micro estación marca Spectrum ® Technologies, Inc. modelo 1425.

Los datos microbiológicos se transformaron a base logarítmica (Log_{10}) para su análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias ($\text{LSD}_{0.05}$) con el programa computacional Statistical Analysis System (SAS por sus siglas en Ingles) versión 9.0 (SAS, 2004).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Temperatura

La temperatura ambiental registrada en el sitio de estudio durante los 87 días en los que se desarrolló el experimento, estuvo en el rango de -1.6°C a 38.2°C con una media de 15°C (Figura 4).

Con respecto a la temperatura registrada en los sustratos de los diferentes tratamientos, se observó que los tratamientos con mayor contenido de gallinaza (tratamientos 7:3 y 5:5), mostraron mayores temperaturas comparados con los tratamientos con menor proporción de esta. La temperatura del tratamiento 5:5 fue de 18.57°C y los valores extremos fueron de 13°C y 25.6°C ; el tratamiento 10:0 presentó temperatura máxima de 20.3°C , mínima de 11.3°C y media de 14.97°C (Figura 5). A este respecto Tiquia (2002) menciona que el aumento en la temperatura se encuentra relacionado con un aumento en la tasa de descomposición, mientras que la disminución de la temperatura se encuentra relacionada con el declive de la actividad microbiana y de las fracciones lábiles de la materia orgánica.

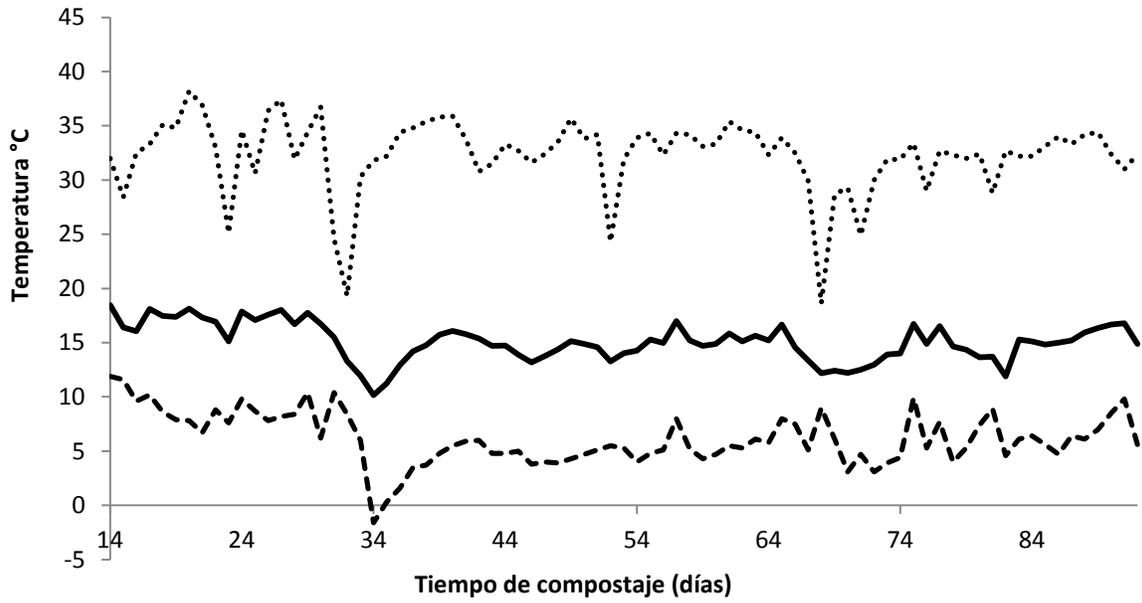


Figura 4. Temperatura ambiental durante el proceso de compostaje. temperatura máxima, — temperatura media, - - - temperatura mínima.

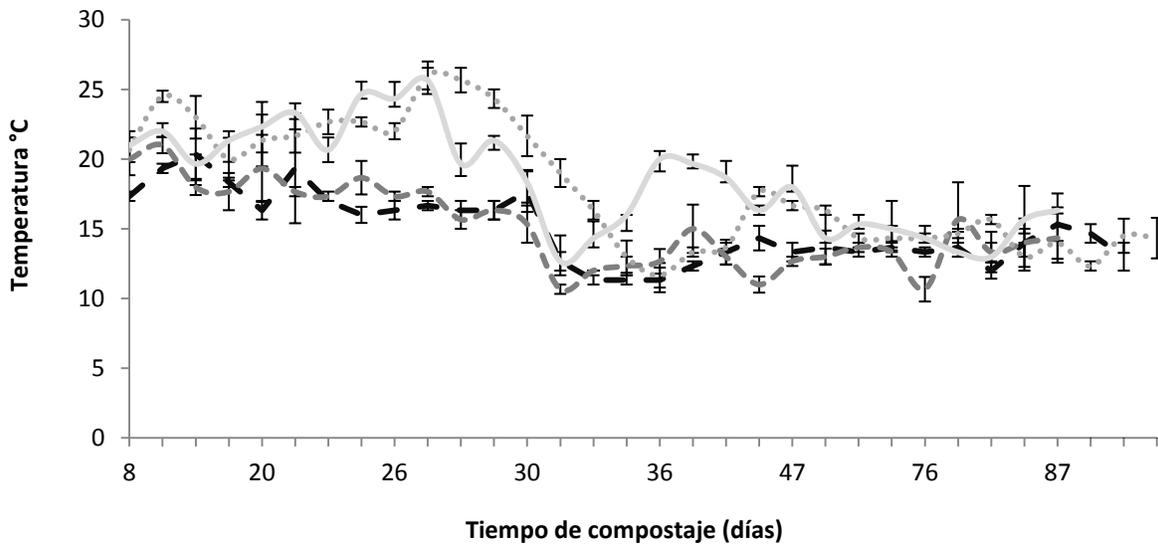


Figura 5. Temperatura durante el proceso de compostaje de los diversos tratamientos: 10:0 (—), 9:1(- - -), 7:3 (.....) y 5:5 (—).

5.2 Poblaciones microbianas

Los análisis de varianza efectuados para cada uno de los grupos microbianos mostraron diferencias significativas entre tratamientos de las mezclas de cachaza y gallinaza para al menos uno de los muestreos realizados durante el proceso de compostaje (ver anexo I).

Bacterias totales: Los tratamientos 9:1, 7:3 y 5:5 presentaron sus máximos en los días 10 y 24 con valores entre 9.48 y 9.89 Unidades Logarítmicas (ULog); y sus valores mínimos fueron entre 7.60 y 8.19 ULog, esto puede deberse al agotamiento de la fuente nitrógeno. En el muestreo final (87 días), los tratamientos que arrojaron los valores más altos en sus poblaciones de bacterias totales fueron 9:1 y 7:3; el tratamiento que presentó la menor población bacteriana, fue el tratamiento 10:0 (Figura 6A), esto indica una influencia de la gallinaza, sobre los otros materiales, en las poblaciones de bacterias totales, debido a las concentraciones de nitrógeno.

Hongos totales (HT): Los HT no presentaron una tendencia clara de crecimiento durante el proceso de compostaje. El tratamiento 10:0 presentó poblaciones bajas oscilando entre 4.4 a 5 ULog, el 9:1 mostró tres picos de actividades en los 10, 45 y 87 días con valores de 5.33, 5.49 y 5.33 ULog, respectivamente, y el 7:3 a los 87 días tuvo 5.58 ULog, presentando la mayor cantidad de poblaciones fúngicas. El tratamiento 5:5 mostró un máximo en sus poblaciones a los 73 días (Figura 6B). A este respecto Toumela *et al.* (2000) mencionan que los hongos requieren un nivel moderado de nitrógeno para su desarrollo, lo cual concuerda con lo observado en el presente experimento. La adición de gallinaza a la cachaza significó un aumento de nutrientes el cual se ha relacionado con el aumento de las poblaciones fúngicas. Chunha-Queda (2007) menciona que las bacterias podrían consumir nutrientes y debido a esto inhibir el desarrollo de

los hongos. La población de HT se mantuvo casi constante durante todo el proceso de compostaje. Esto puede deberse a que los hongos, en su mayoría son mesófilos, los cuales según Dix y Webster (1995) se pueden encontrar a temperaturas entre 5 y 37 °C, pero su desarrollo óptimo se encuentra entre los 25 y 30 °C, que únicamente alcanzó el tratamiento 5:5 con un valor máximo de 25.6 °C.

Microorganismos ligninolíticos: En los tratamientos 10:0, 9:1 y 7:3 las poblaciones más altas se presentaron en la etapa más temprana conforme la proporción de gallinaza fue mayor. En estos casos las dosis bajas de gallinaza permitieron incrementar más rápidamente las poblaciones de los microorganismos ligninolíticos. El tratamiento 10:0, mostró su máximo de microorganismos ligninolíticos al día 45 (5 ULog), el tratamiento 9:1, expresó en los días 10 y al 24 las mayores poblaciones de este grupo microbiano (5.67 y 5.51 ULog, respectivamente), y el 7:3 mostró su máximo a los 10 días (6.42 ULog). En contraste con el tratamiento 5:5 que mostró baja población de ligninolíticos en todos los muestreos (Figura 6C). Esto podría deberse a un exceso en la cantidad de nitrógeno total proporcionado por la gallinaza, ya que este tratamiento fue el de la dosis más alta. Toumela *et al.* (2000) mencionan que para la degradación de la lignina es un prerrequisito un bajo contenido de nitrógeno.

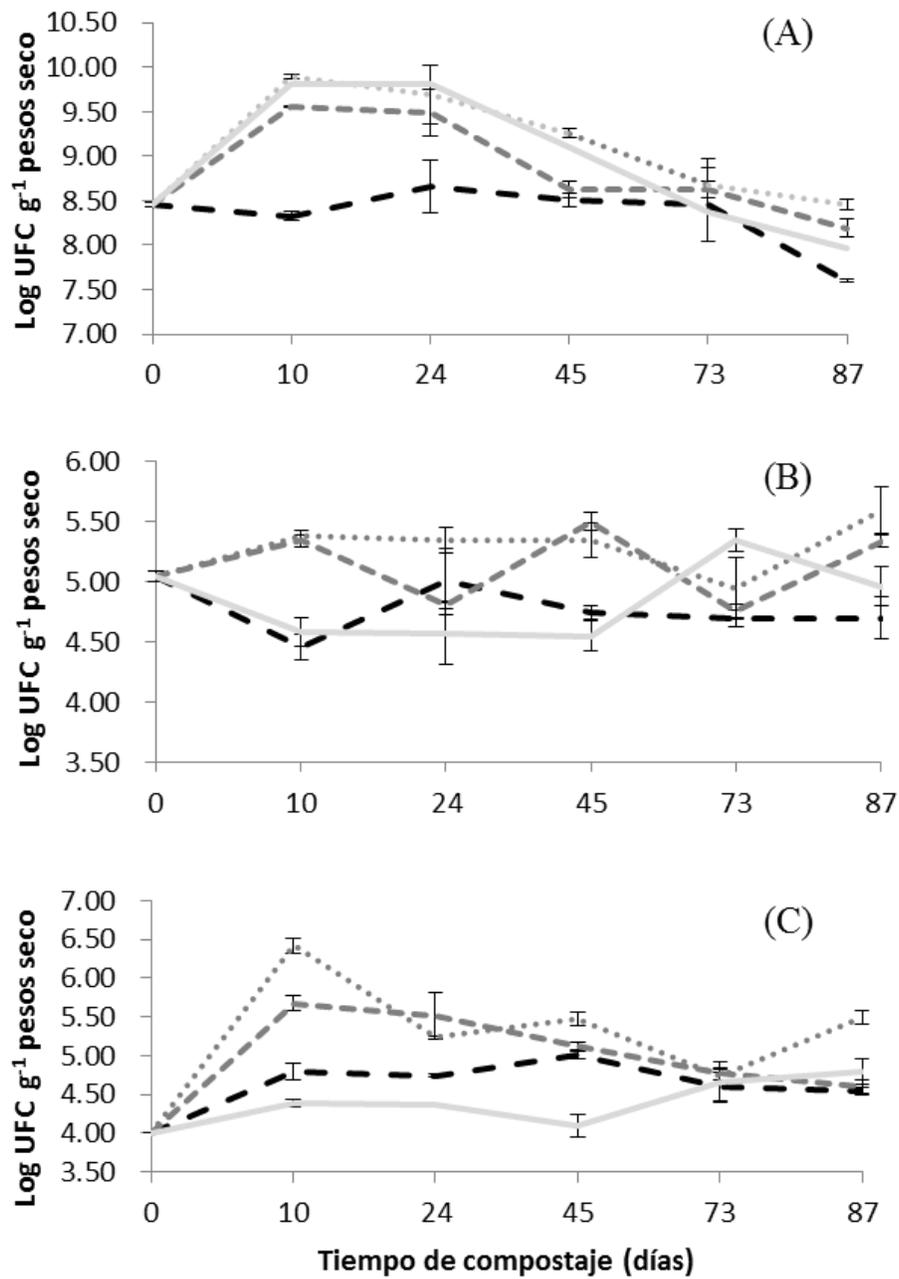


Figura 6. Dinámica de crecimiento de bacterias (A), hongos (B) y microorganismos ligninolíticos (C) durante el proceso de compostaje de mezclas de cachaza y gallinaza. 10:0 (— — —), 9:1 (— — —), 7:3 (·····) y 5:5 (———).

Las poblaciones de bacterias totales se cuantificaron en un rango de 7.6 a 9.89 ULog, comparado con la población de hongos totales que mostraron poblaciones menores y cuyo rango fue entre 4.45 a 5.58 ULog. Con respecto a las poblaciones de ligninolíticos estos incrementaron sus poblaciones conforme transcurrió el tiempo de compostaje, los tratamientos se movieron en un rango de 4.1 a 6.5 Ulog (Anexo II)

5.3 Evolución del nitrógeno durante el proceso de compostaje

Solo a los 45 y 87 días se tomaron muestras de todas las repeticiones de cada tratamiento, por lo que sólo para estas dos fechas de muestreo los datos se analizaron estadísticamente. Los análisis de varianza mostraron diferencias significativas entre tratamientos en al menos uno de los muestreos para las variables NT, amonio y nitratos (Anexo II).

La concentración del NT aumentó en todos los tratamientos con respecto a su valor inicial (Figura 7A). Según Liu (2008) este aumento es esperado, debido a la pérdida neta de masa seca y por ende la evolución del carbono y la pérdida del CO₂. El tratamiento 5:5 al final presentó el mayor porcentaje (4.7 %) de NT (Figura 7A), el cual es mayor a los encontrados por Hernández *et al.* (2008) quien reporta para el compost de cachaza 1.6% de NT final. Esto nos indica que la adición de la gallinaza aumenta el porcentaje de NT en el compost. El NH₄⁺-N para los tratamientos 10:0, 9:1 y 7:3 no mostró grandes cambios a través del tiempo; a diferencia del tratamiento 5:5 que presentó una disminución en esta variable, a pesar de ello, este tratamiento es quien presenta al final del experimento la mayor cantidad de NH₄⁺-N con 268.33 mg kg⁻¹ (Figura 7B). A este respecto, Méndez *et al.* (2011) reportaron para un compost de 100% cachaza adicionado con 0.5% de N y uno sin aditivo 1,195.1 y 246.2 mg Kg⁻¹ de NH₄⁺-N final,

respectivamente. Los valores finales de NT para todos los tratamientos pueden ser un indicativo de la madurez de los sustratos. Al respecto Raj y Antill (2011), menciona que valores menores a 400 mg kg^{-1} de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ indican la madurez del compost. El $\text{NO}_3^- \text{-N}$ mostró un aumento con respecto de sus valores iniciales; no obstante, los valores finales no muestran diferencias entre tratamientos y se encontraron entre $657.19 \text{ mg kg}^{-1}$ del tratamiento 7:3 y $483.00 \text{ mg kg}^{-1}$ del tratamiento 5:5 (Figura 7C). Méndez *et al.* (2011) reporta para un compost de 100% cachaza adicionado con 0.5 % de N y uno sin aditivo $1,372.8$ y 210.9 mg kg^{-1} de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ al final del proceso de compostaje, respectivamente.

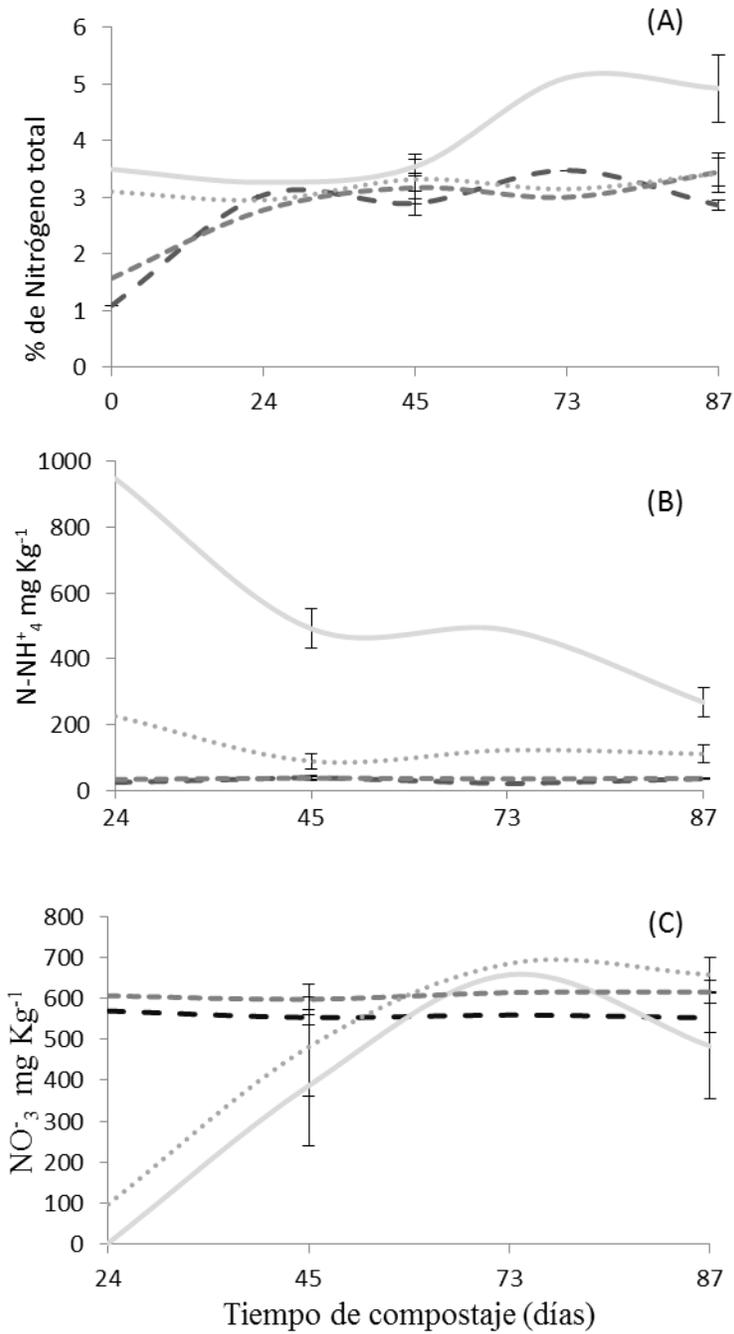


Figura 7. Cambios en el % de Nitrógeno Total (A) y en las fracciones minerales de nitrógeno de NH₄⁺-N (B) y NO₃⁻-N (C) para los cuatro tratamientos de cachaza y gallinaza 10:0 (— —), 9:1 (— · — ·), 7:3 (· · · ·) y 5:5 (—) durante el proceso de composteo.

En el tratamiento 7:3 el amonio disminuyó, los nitratos aumentaron, pero no se observó un aumento en el porcentaje de NT final. En el tratamiento 5:5 el amonio disminuyó significativamente y el nitrato aumento, así como también el porcentaje de NT final (Figura7), esto debido posiblemente a la transformación del amonio a nitratos por las bacterias nitrificantes y a la pérdida de carbono por respiración. Según Tiquia (2002) la nitrificación ocurre cuando la temperatura se encuentra por debajo de los valores mesófilos (40°C), el proceso depende de la cantidad de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ disponible para la nitrificación bacteriana.

5.4 Respiración

En la Figura 8 se puede observar el comportamiento del CO_2 durante el proceso de compostaje. Los tratamientos que mostraron mayor producción de CO_2 fueron el tratamiento 7:3 y 5:5, alcanzando 6,908 y 5,573 ppm de CO_2 , respectivamente.

Los valores alcanzados de temperatura en los tratamientos 10:0 y 9:1 fueron los más bajos, lo cual concuerda con lo obtenido por Velasco-Velasco *et al.* (2004) quien observó que a mayor temperatura mayor producción de CO_2 . Kalamdhad y Kasmi (2009) consideran que la técnica más directa para medir la estabilidad del compost es la evolución del dióxido de carbono (CO_2), ya que ésta en realidad mide la respiración y por lo tanto la actividad biológica aeróbica. Esto quiere decir que los materiales que no aumentaron su concentración de CO_2 durante el proceso de compostaje no logran alcanzar una madurez adecuada.

A pesar de las bajas temperaturas ambientales que se presentaron entre los días 30 y 35 (valores mínimo de -1.6 °C) se observó un aumento en emisión de CO_2 para esas mismas fechas (Figura 8). Esto pudiera relacionarse con el volteo realizado el día 30.

Los tratamientos con mayor proporción de gallinaza (7:3 y 5:5) mostraron mayores concentraciones de CO₂ durante todo el proceso de compostaje; esto podría explicar las mayores poblaciones de BT y microorganismos ligninolíticos que se presentaron en dichos tratamientos.

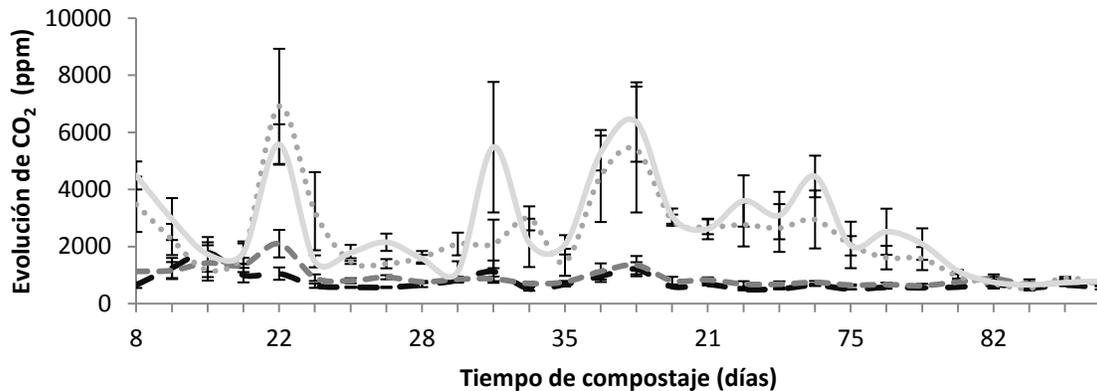


Figura 8. Emisiones de CO₂ en el proceso de compostaje de cachaza reactivada con gallinaza. 10:0 (— —), 9:1 (---), 7:3 (.....) y 5:5 (——).

5.5 Relación C:N

En el Cuadro 3 se presentan los valores finales de la relación carbono:nitrógeno de los tratamientos. En donde podemos observar que a mayor cantidad de gallinaza adicionada a la cachaza menor fue la relación carbono:nitrógeno. Esta relación es una de las principales características que describen el proceso de compostaje, la disminución de esta relación se debe a que durante dicho proceso el C se transforma en CO₂ (Golueke, 1981; Vourinen y Saharinen, 1997). La caída en la relación C:N es considerada un indicador de madurez del compost. Como se puede observar en el Cuadro 3, la relación carbono:nitrógeno disminuyó para todos los tratamientos durante el proceso de compostaje como consecuencia de la estabilización de la

materia orgánica. Esto es debido a que durante el proceso de descomposición se pierde carbono, en especial en forma de CO₂, que es emitido de la masa de la composta como un producto metabólico; y el contenido de N por unidad de material aumenta lo que da lugar a la disminución de la relación C:N (Vourinen y Saharinen, 1997; Raj y Antil, 2011). En los tratamientos 7:3 y 5:5 se presentó una relación entre las fuentes de carbono y de nitrógeno más bajas de 5.64 y 4.17, respectivamente; Goyal *et al.* (2005) menciona que cuando la relación C:N se encuentra por debajo de 20 es un indicativo de la madurez del compost.

Cuadro 3 Valores finales de materia orgánica, carbono total, nitrógeno total y relación C:N del compost obtenido en los diferentes tratamientos de mezclas de cachaza y gallinaza.

Tratamiento	Materia orgánica %	Carbono Total %	Nitrógeno Total %	Relación C:N
10:0	33.30	19.59	2.86	6.85
9:1	36.11	21.24	3.45	6.17
7:3	32.80	19.29	3.42	5.64
5:5	32.30	19.71	4.72	4.17

6. CONCLUSIONES

La actividad microbiana en los tratamientos de mezclas de cachaza y gallinaza influyó fuertemente la temperatura alcanzada en el proceso de compostaje. También la temperatura ambiental fue un factor que influyó en la temperatura dentro de los contenedores, particularmente cuando la temperatura ambiental disminuyó hasta -1.6°C , afectando a las poblaciones de microorganismos.

Mayor proporción de gallinaza adicionada condujo a mayor población y respiración microbiana, y consecuentemente a mayor temperatura promedio dentro de los contenedores. Esto se observó en los tratamientos 7:3 y 5:5. Siendo el 5:5 el que presentó la mayor transformación de amonio a nitratos.

La adición de gallinaza a la cachaza almacenada, incrementó las poblaciones de bacterias totales, hongos totales y microorganismos ligninolíticos. Lo que se relacionó con un aumento en la cantidad final de $\text{NO}_3\text{-N}$ en todos los tratamientos, en especial del tratamiento que contenía el 50% de cachaza y el 50% de gallinaza.

La emisión de CO_2 en el proceso de compostaje de cachaza reactivada con gallinaza fue mayor para los tratamientos 7:3 y 5:5, esto debido a que la cantidad de nitrógeno adicionado mediante la gallinaza propició un aumento en las poblaciones de BT, HT y microorganismos ligninolíticos que en los tratamientos con poco o nada de gallinaza (10:0 y 9:1).

7. LITERATURA CITADA

- Almaráz, J., y R. Ferrera-Cerrato. 2007. Fijación simbiótica de nitrógeno en leguminosas. 225-238pp. *In*: Ferrera-Cerrato, R. Alarcón, A. (Eds). Microbiología del suelo Trillas. México, D.F.
- Arreola-Enriquez, J., D.J. Palma-López., S. Salgado-García., W. Camacho-Chiu., J. J. Obrador-Olán., J. F. Juárez-López., y L. Pastrana-Aponte. 2004. Evaluación de abono órgano-mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 3: 351–357.
- Barrington, S., D. Choinére, M. Trigui and W. Knigh. 2002. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Bioresource Technology* 83: 189-194.
- Basanta R., y M. A. García P., J.E. Cervantes M., H. Mata V., y G. Bustos V. 2007. Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 5: 293–305.
- Bernal, M. P., J. A. Albuquerque and R. Moral. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology* 100: 5444–5453.
- Bernal, M.P., A.F. Navaro, J. Cegarra, and D. García. 1996. Carbon and nitrogen transformacion during composting of sweet sorghum bagasse. *Biology Fertility Soils* 22: 141-148.
- Bonito, G., O. S. Isikhuemhen and R. Vilgalys. 2010. Identification of fungi associated with municipal compost using DNA-based techniques. *Bioresource technology* 101: 1021–

1027.

Brady, N.C. and R.R. Weil. 2008. The Nature and properties of Soils. 14th ed., Prentice Hall.

New Jersey. pp965.

Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. 1982. Total N. *In: Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and microbiological properties.* Page, A., Miller, R., Keeney, D. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. USA pp. 371-378.

Bueno, M., B. Díaz. 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje. *In: Compostaje.* C. Moreno, y H. Moral, (Eds.). Mundi-Prensa. Madrid, España pp. 94- 109.

CONADESUCA. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. 2012. Primer estimado de producción de caña y azúcar zafra 2011-2012. Consultado en Internet:

<http://www.conadesuca.gob.mx/documentos%20de%20interes/1er%20Estimado%2011-12%20120203%20final%20ordenado.pdf>

Chang, Y. and H.J. Hudson. 1967. The fungi of wheat straw compost. *Transactions of the British Mycological Society.* 50: 696-666.

Chroni C., A. Kyriacou, T. Manios, and K. Lasaridi. 2009. Investigation of the microbial community structure and activity as indicators of compost stability and composting process evolution. *Bioresource technology* 100: 3745–3750.

Danon, M., I. Franje- Whittle. H. Insam. Y. Chen, Y Hadar. 2008. Molecular analysis of bacterial community sucesion during prolonged compost curing. *Federation of European*

- Microbiological Societies. 65: 133 – 144.
- Day, M., K. Shaw, 2005. Procesos biológicos, químicos y físicos del compostaje .*In*: Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola. J. Stoffella, B. Kahn, B. (Eds.). Mundi-Prensa, Barcelona, Madrid pp. 18 – 49.
- Dix, N. J. and J. Webster. 1995. Fungal Ecology. Champan & Hall. Cambridge, Great Britain. pp 595.
- Ekinci, K., H. Keener. and D. Akboat. 2006. Effects of feed stock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. *Bioresource Technology*. 97:922-353.
- Estrada-Botello M.A., L. Nikolskii-Gavrilov, F. Gavy-Reyes, J. D. Etchevers-Barra y O. L. Palacios-Velez. 2002. Balance de nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo. *TERRA Latinoamericana* 20: 189-198.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2012. FAO statistics [En línea]. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/index.html> (revisado el 20 de Mayo 2012).
- García-Torres R., E. Ríos-Leal., A. Martínez-Toledo., F. R. Ramos-Morales., J.S. Cruz-Sánchez., M. C. Cuevas-Díaz. 2011. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27: 31–39.
- Golueke, C. G., 1981. Principles of biological resources recovery. *Biocycle*. 22: 33-40.
- Goyal, S., S.K.Dhull., and K.K. Kapoor. 2005. Chemical and biological changes during composting of different organic waste and assessment of compost maturity. *Bioresource*

- Technology 96:1584-1591.
- Granit, T., Y. Chen. and Y. Hadar. 2007. Humic acid bleaching by white-rot fungi isolated from biosolids compost. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 1040–1046
- Hans, S., C. Zaborosch. 1997. *Microbiología general*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 654pp.
- Hernández M., G.I., S. Salgado G., D.J. Palma L., L.C. Lagunes S., M. Castelán E. y O. Ruiz R. 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en Gleysol Mólico de Chiapas, México. *Interciencia*. 33: 855-860
- Kalamdhad S., A., and A.A. Kasmi. 2009. Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. *Chemosphere* 74: 1327-1334.
- Liang, C. Das, K. McClendon, R. 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*. 86:131-137.
- Liu C. 2008. Changes in nitrogen budgets and nitrogen use efficiency in the agroecosystems of the Changjiang River basin between 1980 and 2000. *Nutrient Cycling in agroecosystems* 80: 19-37.
- Méndez P., M. A., Sánchez H., R., Palma-López, D. J., Salgado G., S. 2011. Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. Caracas, Venezuela. *Interciencia*. 36: 45-52.
- Meunchang, S., S. Panichsakpatana, and R.W. Weaver. 2005. Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill. *Bioresource technology* 96: 437–442.
- Miyatake, F. and K. Iwabuchi. 2006. Effects of compost temperature on oxygen uptake rate,

- specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*. 97:961-965.
- Moreno, C., y B. Mormeneo. 2008. Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. *In:* 112- 140. Moreno, C. and Moral, H. (Eds.) Compostaje. Mundi-prensa. Madrid.
- Ochoa, P.A., J. J. Cabello E., A. Sagastume G., L. Hens, y C. Vandecasteele. 2010. Residue from Sugarcane Juice Filtration (Filter Cake): Energy Use at the Sugar Factory. *Waste and Biomass Valorization* 1: 407–413.
- Papadimitrio, E., W. Bidlingmaier., Gea, T. 2010. 14 Fundamentals in Selecting Input and Output Variables for Composting Process Automatic Controllers. *Compost Science & Utilization*, 18: 6-21.
- Poulsen, T. 2010. Temperature, Pressure and Air Flow Distribution in Passively aerated compost piles. *Compost Science & Utilization*. 18 : 127-134.
- Radulovich., R. 2009. Método gravimétrico para la determinación in situ. La humedad volumétrica del suelo. *Agronomía costarricense* 33: 121-124.
- Raj, D. and R.S. Antil. 2011. Evolution of maturity and stability of compost prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*. 102: 2868-2873.
- Rasul, G., K. S. Khan, T. Müller, and R. G. Joergensen. 2008. Soil-microbial response to sugarcane filter cake and biogenic waste compost. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 355–360.
- Salgado G.S., D.J. Palma-López., R. Nuñez E., L.C. Lagunes E. y H. Debernardi V. 2000.

- Manejo de fertilizantes y abonos orgánicos. Campus Tabasco, CP- ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 135p.
- Sánchez, G. 2009. Caracterización microbiológica del proceso de compostaje a partir de residuos azucareros. *Agronomía Tropical*. 59: 309 – 316.
- Sánchez, H., R., V. M. Ordaz C., G. S. Benedicto V., C. I. Hidalgo M., y D. J. Palma L. 2005. Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricomposto de cachaza y estiércol. *Interciencia* 30: 775–779.
- Sangwan, P., C. Kaushik., y V. Grag. 2009. Vermicomposting of sugar industry waste (press mud) mixed with dung employing an epigeic earthworm *Eisenia fetida*. *Waste Manag Res Online*. 00:1-5.
- Secretaría de Economía. Dirección General de Industrias Básicas. 2012. Análisis de la situación económica, tecnológica y de política comercial del sector edulcorantes en México. Consultado en internet: http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/Analisis_Sectorial_Mercado_Edulcorantes.pdf
- SEMARNAT. 2002. Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación, México D.F.* pp. 85
- Toumela, M., M. Vikman., A. Hatakka., and M. Itävaara. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*. 72: 169-183.
- Varela, L., y E. Amora. 2007. Los hongos como componentes de la diversidad del suelo. *In: Microbiología del suelo*. R. Ferrera-Cerrato., A. Alarcón, (Eds). Trillas. México, D.F.

76- 89.

- Vargas-García, M.C., M. J. López, F. Suárez, J. Moreno. 2005. Laboratory study of inocula production for composting processes. *Bioresource technology* 96: 797–803.
- Vargas-García., M.C., F. Suárez-Estrella, M.J. López, and J. Moreno. 2010. Microbial population dynamics and enzyme activities in composting processes with different starting materials. *Waste Management* 30: 771-778.
- Velarde, E., M. León., I. Cuéllas, y Villegas. 2004. Producción y aplicación de compost. Orientado a las condiciones de la agroindustria azucarera. Editorial MINREX. Habana, Cuba. pp 182.
- Velasco-Velasco, J., B. Figuero-Sandoval., R. Ferrera- Cerrato., A. Trinidad-Santos, y J. Gallegos-Sánchez. 2004. CO₂ y dinámica de poblaciones microbianas en composta de estiércol y paja con aireación. *Terra Latinoamericana* 3:307-316.
- Velasco-Velasco., J., R., Parkinson, and V. Kuri. 2011. Ammonia emissions during vermicomposting of shepp manure. *Bioresource Technology* 102: 10959-10964.
- Venegas-González, J., J. Lenom C., A. Trinidad-Santos, F. Gavi-Reyes, y P. Sánchez-García. 2005. Análisis químico de compost y efecto de su adición sobre la producción de biomasa en zarzamora. *Terra Latinoamericana* 3: 285–292.
- Walkley A., and I. A. Black . 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38
- Xiao, Y. Zeng, M. Yang, H. Ma, H. Hang, C. Xu, Y. Huang, J. Fan, Z. 2011. Changes in the actinomycetal communities during continuous thermophilic composting as revealed by

denaturing gradient gel electrophoresis and quantitative PCR. *Bioresource Technology* 102: 1383–1388

Zérega, M., L., 1993. Manejo y uso agronómico de la cachaza en suelos cañameleros. *Caña de Azúcar* 11: 1–13.

Saludesa, R. Iwabuchi, K. Kayanumab, A. Shigab, T. 2007. Composting of dairy cattle manure using a thermophilic– mesophilic sequence. *Biosystems Engineering*. 98:198–205.

- Clark, F. 1965. Agar plate method for total microbial count. *In: Methods of soil analysis. Part 2. .*
 Chemical and microbiological properties. Page, A.; Miller, R.; Keenedy, D. (Eds)
 American Society Agronomy. Madison, Wisconsin. USA. pp: 1460 – 1466.
- Hesse P.R. 1971. A text Book of Soil Chemical Analysis. CBS Publishers and Distributors,
- García, E. 1978. Los climas del Valle de México según el sistema de clasificación climática de
 Koeppen modificado por la autora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto
 de Geografía. 246 páginas.
- Wollum II. A. 1982. Cultural methods for soil microorganisms. *In: Methods of Soil Analysis*
 Part 2. Chemical and microbiological properties. Page, A., Miller, R., Keenedy, D. (Eds)
 American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. USA. pp 781-802.
- Robert, F. 1990. Impact if environmental factor son populations of soil microorganisms. *The*
American Biology Teacher 52: 364- 369.
- Subba R., N. S. 1992. Biofertilizers in agricultura. Oxford & IBH Publishing Co. New Delhi,
 India.
- Labrador, J. 1996. La materia orgánica en los agroecosistemas. Mundi-prensa. Madrid. 173p
- Vourinen, H.A. and Saharinen, H. M. 1997. Evolution of microbiological and chemical
 parameters during manures straw co-composting in a drum composting system. 66: 19-
 29.
- Arreola, J. 2001. Evaluación de abono orgánico-mineral de cachaza en el cultivo de caña de
 azúcar en Tabasco, México. Tesis de Maestría. Montecillo, Estado de México. 133pp.
- SAS Institute Inc. 2004. Whats is new in SAS ® 9.0, 9.1, 9.1.2 and 9.1.3. Cary, NC, USA.
- Tiquia S. M. 2002. Microbial Transformation of Nitrogen During Composting. *In: Microbiology*

- of composting. Insam H., Riddech N., and Klammer S. (Eds.). Springer, Berlin pp: 237-245.
- Velasco-Velasco, J. 2002. Alternativa tecnológica del colegio de postgraduados. Tesis de Maestría. Colegio Postgraduados. Texcoco, Estado de México. pp 161.
- García, E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª Edición. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. 217 p
- Estrada, M. 2005. Manejo y procesamiento de la gallinaza. Revista Lasallista de Investigación.. Antioquía, Colombia. 2: 43-48.
- Tiquia, S. M. 2005. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. Journal Applied Microbiology 99: 816-828.
- Hernández, M. 2007. Vinaza y composta de cachaza como fuente de NPK en caña de azúcar. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Cárdenas, Tabasco. 70pp.
- Cunha-Queda, A.C., H.M. Ribeiro, A. Ramos, and F. Cabral. 2007. Study of biochemical and microbiological parameters during composting of pine and eucalyptus bark. Bioresource Technology 98: 3213 – 3220.

8. ANEXOS

ANEXO I. Análisis de varianza

Cuadro A 1. Análisis de varianza para bacterias totales en el muestreo a los 10 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	9.16411763	3.05470588	289.75	<.0001
Error	18	0.18976855	0.01054270		
Total correcto	21	9.35388618			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.979712	1.096864	0.102678	9.361020	
Fuente	DF	Tipo I SS	la media	Cuadrado de F-Valor	Pr > F
Trat	3	9.16411763	3.05470588	289.75	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	la media	Cuadrado de F-Valor	Pr > F
Trat	3	9.16411763	3.05470588	289.75	<.0001

Cuadro A 2. Análisis de varianza bacterias totales para el muestreo a los 24 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2.60262685	0.86754228	2.88	0.0768
Error	13	3.92247532	0.30172887		
Total correcto	16	6.52510217			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.398864	5.804110	0.549299	9.463958	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	2.60262685	0.86754228	2.88	0.0768
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	2.60262685	0.86754228	2.88	0.076

Cuadro A 3. Análisis de varianza para las bacterias totales en el muestreo a los 45 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.51384261	0.50461420	28.31	<.0001
Error	12	0.21387071	0.01782256		
Total correcto	15	1.72771332			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.876212	1.506467	0.133501	8.861870	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.51384261	0.50461420	28.31	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.51384261	0.50461420	28.31	<.0001

Cuadro A 4. Análisis de varianza para las bacterias totales en el muestreo a los 73 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.34927438	0.11642479	0.26	0.8566
Error	18	8.20937538	0.45607641		
Total correcto	21	8.55864976			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.040810	7.915278	0.675334	8.532035	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	0.34927438	0.11642479	0.26	0.8566
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	0.34927438	0.11642479	0.26	0.8566

Cuadro A 5. Análisis de varianza para las bacterias totales en el muestreo a los 87 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.72987420	0.57662473	7.43	0.0038
Error	13	1.00952829	0.07765602		
Total correcto	16	2.73940249			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.631479	3.451144	0.278668	8.074665	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.72987420	0.57662473	7.43	0.0038
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.72987420	0.57662473	7.43	0.0038

Cuadro A 6. Análisis de varianza para los hongos totales a los 10 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	3.59582996	1.19860999	24.89	<.0001
Error	17	0.81862331	0.04815431		
Total correcto	20	4.41445327			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.814558	4.459269	0.219441	4.921007	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	3.59582996	1.19860999	24.89	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	3.59582996	1.19860999	24.89	<.0001

Cuadro A 7. Análisis de varianza para los hongos a los 24 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.78082513	0.59360838	3.85	0.0262
Error	19	2.92944998	0.15418158		
Total correcto	22	4.71027511			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.378072	8.002617	0.392660	4.906640	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.78082513	0.59360838	3.85	0.0262
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.78082513	0.59360838	3.85	0.0262

Cuadro A 8. Análisis de varianza para los hongos totales a los 45 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2.85098174	0.95032725	16.84	<.0001
Error	17	0.95914047	0.05642003		
Total correcto	20	3.81012221			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.748265	4.719409	0.237529	5.033024	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	2.85098174	0.95032725	16.84	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	2.85098174	0.95032725	16.84	<.0001

Cuadro A 9. Análisis de varianza para los hongos totales a los 73 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	1.18494935	0.39498312	5.61	0.0080
Error	16	1.12575932	0.07035996		
Total correcto	19	2.31070867			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.512808	5.429276	0.265255	4.885633	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.18494935	0.39498312	5.61	0.0080
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	1.18494935	0.39498312	5.61	0.0080

Cuadro A 10. Análisis de varianza para los hongos totales a los 87 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2.25901950	0.75300650	5.71	0.0075
Error	16	2.11078270	0.13192392		
Total correcto	19	4.36980220			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.516962	7.153359	0.363213	5.077521	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	2.25901950	0.75300650	5.71	0.0075
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	2.25901950	0.75300650	5.71	0.0075

Cuadro A 11. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 10 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	24.26361629	8.08787210	16.03	<.0001
Error	14	7.06160579	0.50440041		
Total correcto	17	31.32522209			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.774571	13.35832	0.710212	5.316622	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	24.26361629	8.08787210	16.03	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	24.26361629	8.08787210	16.03	<.0001

Cuadro A 12. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 24 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	3.76714491	1.25571497	7.11	0.0030
Error	16	2.82667369	0.17666711		
Total correcto	19	6.59381861			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.571315	8.408327	0.420318	4.998829	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	3.76714491	1.25571497	7.11	0.0030
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	3.76714491	1.25571497	7.11	0.0030

Cuadro A 13. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 45 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	4.70568816	1.56856272	45.33	<.0001
Error	18	0.62278937	0.03459941		
Total correcto	21	5.32847753			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.883121	3.735861	0.186009	4.979017	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	4.70568816	1.56856272	45.33	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	4.70568816	1.56856272	45.33	<.0001

Cuadro A 14. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 73 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.08599467	0.02866489	0.14	0.9353
Error	16	3.30453322	0.20653333		
Total correcto	19	3.39052789			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.025363	9.680539	0.454459	4.694567	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	0.08599467	0.02866489	0.14	0.9353
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	0.08599467	0.02866489	0.14	0.9353

Cuadro A 15. Análisis de varianza para los microorganismos ligninolíticos a los 87 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	3.46928289	1.15642763	17.48	<.0001
Error	20	1.32296037	0.06614802		
Total correcto	23	4.79224327			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.723937	5.296131	0.257193	4.856235	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	3.46928289	1.15642763	17.48	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	3.46928289	1.15642763	17.48	<.0001

Cuadro A 16. Análisis de varianza para el nitrógeno total a los 45 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	0.66342500	0.22114167	2.24	0.1614
Error	8	0.79106667	0.09888333		
Total correcto	11	1.45449167			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media	
	0.456122	9.722975	0.314457	3.234167	
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	0.66342500	0.22114167	2.24	0.1614
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	0.66342500	0.22114167	2.24	0.1614

Cuadro A 17. Análisis de varianza para el nitrógeno total a los 87 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	7.00769167	2.33589722	7.32	0.0111
Error	8	2.55120000	0.31890000		
Total correcto	11	9.55889167			
		R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media
		0.733107	15.41175	0.564712	3.664167
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	7.00769167	2.33589722	7.32	0.0111
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	7.00769167	2.33589722	7.32	0.0111

Cuadro A 18. Análisis de varianza para el amonio a los 45 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	429213.4700	143071.1567	45.60	<.0001
Error	8	25099.3800	3137.4225		
Total correcto	11	454312.8500			
		R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media
		0.944753	34.20623	56.01270	163.7500
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	429213.4700	143071.1567	45.60	<.0001
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	429213.4700	143071.1567	45.60	<.0001

Cuadro A 19. Análisis de varianza para el amonio a los 87 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	107907.8333	35969.2778	17.38	0.0007
Error	8	16559.1933	2069.8992		
Total correcto	11	124467.0267			
		R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media
		0.866959	40.27396	45.49614	112.9667
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	107907.8333	35969.2778	17.38	0.0007
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	107907.8333	35969.2778	17.38	0.0007

Cuadro A 20. Análisis de varianza para nitratos a los 45 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	75892.9167	25297.6389	0.89	0.4873
Error	8	227761.3333	28470.1667		
Total correcto	11	303654.2500			
		R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media
		0.249932	33.42864	168.7310	504.7500
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	75892.91667	25297.63889	0.89	0.4873
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	75892.91667	25297.63889	0.89	0.4873

Cuadro A 21. Análisis de varianza para nitratos a los 87 días.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	51994.5625	17331.5208	1.15	0.3881
Error	8	121073.1667	15134.1458		
Total correcto	11	173067.7292			
		R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Valor Media
		0.300429	21.32848	123.0209	576.7917
Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	51994.56250	17331.52083	1.15	0.3881
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Trat	3	51994.56250	17331.52083	1.15	0.3881

ANEXO II. Cuadros de comparación de medias.

Los siguientes cuadros presentan las diferencias estadísticas de los microorganismos que se analizaron.

Cuadro A 22. Poblaciones de bacterias totales en ULog.

Días	0	10	24	45	73	87
Tratamiento	Log ufc g ⁻¹ peso seco					
10:0	8.45±0.03	8.32±0.05 c*	8.66±0.30 b	8.50±0.08 a	8.45±0.42 a	7.60±0.03 c
9:1	8.45±0.03	9.55±0.01 b	9.48±0.26 ba	8.62±0.09 a	8.62±0.09 a	8.19±0.10 ba
7:3	8.45±0.03	9.89±0.03 a	9.68±0.33 a	9.25±0.05 a	8.68±0.29 a	8.45±0.05 a
5:5	8.45±0.03	9.81±0.08 a	9.80±0.12 a	9.10±0.04 a	8.36±0.15 a	7.95±0.22 bc

* Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro A 23. Poblaciones fúngicas durante el proceso de compostaje.

Días	0	10	24	45	73	87
Tratamiento	Log ufc g ⁻¹ peso seco					
10:0	5.04±0.04	4.45±0.11 b*	4.99±0.27 ba	4.74±0.05 b	4.68±0.07 b	4.69±0.17 c
9:1	5.04±0.04	5.33±0.05 a	4.79±0.03 b	5.49±0.08 a	4.75±0.06 b	5.33±0.05 bc
7:3	5.04±0.04	5.37±0.05 a	5.34±0.11 a	5.34±0.14 a	4.93±0.25 b	5.58±0.19 a
5:5	5.04±0.04	4.62±0.12 b	4.56±0.25 b	4.54±0.13 b	5.33±0.10 a	4.95±0.16 bc

* Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro A 24. Poblaciones de microorganismos ligninolíticos durante el proceso de compostaje.

Días	0	10	24	45	73	87
Tratamiento	Log ufc g ⁻¹ peso seco					
10:0	4.00±0.00	4.80±0.11 ba**	4.74±0.03 bc	5.00±0.05 a	4.60±0.18 bc	4.54±0.05 c
9:1	4.00±0.00	5.67±0.10 a	5.51±0.30 a	5.12±0.05 b	4.77±0.08 cb	4.60±0.08 c
7:3	4.00±0.00	6.42±0.10 a	5.23±0.02 c	5.48±0.08 cb	4.73±0.10 d	5.50±0.09 b
5:5	4.00±0.00	4.39±0.05 ba	4.37±0.00 ba	4.09±0.14 b	4.66±0.27 ba	4.79±0.17 a

* Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro A 25. Comparación de medias para el nitrógeno total.

Tratamiento	Días				
	0	24	45	73	87
	%				
10:0	1.09	3.04	2.89±0.20 b*	3.47	2.86±0.09 b
9:1	1.57	2.77	3.17±0.11 ba	3.00	3.44±0.24 b
7:3	3.10	2.95	3.32±0.24 ba	3.14	3.42±0.20 b
5:5	3.49	3.26	3.54±0.12 a	5.11	4.72±0.40 a

* Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro A 26. Comparación de medias para el amonio.

Tratamiento	Días			
	24	45	73	87
	mg kg ⁻¹			
10:0	23.50	38.43±7.84 b*	22.1	35.43±3.09 b
9:1	34.10	38.03±8.36 b	35.8	36.70±4.18 b
7:3	226.00	89.2±23.04 b	123.00	111.40±27.97 b
5:5	947.00	489.33±59.81 a	487.5	268.33±44.38 a

* Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro A 27. Comparación de medias para el nitratos

Tratamiento	Días			
	24	45	73	87
	mg kg ⁻¹			
10:0	569.00	553.00±63.90 a*	559.00	552.00±34.86 a
9:1	606.00	597.33±36.94 a	614.00	615.00±46.64 a
7:3	97.80	481.00±120.59 a	685.00	657.16±41.19 a
5:5	2.72	387.00±147.64 a	657.50	483.00±128.79 a

* Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).