

COMPARACIÓN DE DOS TÉCNICAS DE AIREACIÓN EN LA DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Comparison of two ventilation techniques in the decomposition of organic matter

GC Isaza-Arias ✉, MA Pérez-Méndez JR Laines-Canepa, G Castañón-Nájera

(GCIA)(MAPM)(JRLC)(GCN) Laboratorio de Manejo de Residuos Orgánicos y Laboratorio de Biotecnología. División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT. Km. 0.5 Carr. Villahermosa-Cárdenas, Villahermosa, 86000 Tabasco, México. gloriaconstanzai@hotmail.com

Artículo recibido: 3 de noviembre de 2007, **aceptado:** 26 de noviembre de 2009

RESUMEN. El compostaje aerobio es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de los residuos orgánicos a un material húmico estable conocido como composta y que se utiliza como un producto mejorador de suelo. En este estudio, se compararon dos técnicas de aireación para la degradación de la materia orgánica compuesta de residuos de jardinería y cáscara de cítricos. Una fue, pila estática con aireación forzada (dos aireaciones diarias) y otra pila con el método tradicional de volteo periódico manual (dos volteos semanales). Cada pila contenía 1500 kg de residuos de jardinería y 220 kg de cáscaras de cítricos triturados. Los residuos de jardinería fueron obtenidos en el Campus de la División Académica de Ciencias Biológicas, y las cáscaras de cítricos recolectadas en una frutería de Villahermosa, Tabasco. El proceso de degradación duró 120 d. Las determinaciones analíticas de Temperatura, Humedad, pH, Conductividad Eléctrica, Materia Orgánica, Carbono Orgánico, Nitrógeno Total y Fósforo fueron según la NOM-021-RECNAT-2000. Los resultados mostraron que el comportamiento de la temperatura al final del proceso fue similar en ambos tratamientos (36 °C). La Humedad, Conductividad eléctrica, pH, Materia orgánica, Carbono orgánico, Nitrógeno, relación C/N y Fósforo finales en el tratamiento de aireación forzada fue de 57.22 %, 1.73 dS m⁻¹, 7.95, 39.27 %, 21.82 %, 1.21 %, 18.70, y 277 mg kg⁻¹ respectivamente y de 64.74 %, 1.0 dS m⁻¹, 8.23, 42.80 %, 23.78 %, 1.46 %, 16.51 y 217 mg kg⁻¹ para el volteo manual respectivamente.

Palabras clave: Residuos de jardinería, cáscara de cítricos, composta, tipos de aireación.

ABSTRACT. Aerobic composting is the most frequently used biological process for the conversion of organic waste into a stable humic material known as compost, that is used as a product to improve soil. In this study, two ventilation techniques for the decomposition of organic matter composed of gardening waste and citric fruit peels were compared. One was a static pile with forced ventilation (two daily ventilations) and the other pile followed the traditional method of periodic manual turning over (two weekly turnings). Each pile contained 1500 kg of gardening waste and 220 kg of chopped citrus peel. The garden waste was obtained from the campus of the División Académica de Ciencias Biológicas, and the citrus peels were gathered from a fruit store in Villahermosa, Tabasco. The decomposition process lasted 120 d. The analytical determinations of Temperature, Humidity, pH, Electrical Conductivity, Organic Matter, Organic Carbon, Total Nitrogen and Phosphorus were carried out according to the NOM-021-RECNAT-2000. Results showed that the temperature at the end of the process was similar in both treatments (36 °C). The final values of Humidity, Electrical conductivity, pH, Organic matter, Organic Carbon, Nitrogen, C/N ratio and Phosphorus in the treatment with forced ventilation were 57.22 %, 1.73 dSm⁻¹, 7.95, 39.27 %, 21.82 %, 1.21 %, 18.70 and 277 mg kg⁻¹ respectively, and those for the treatment with manual turning were 64.74 %, 1.0 dS m⁻¹, 8.23, 42.80 %, 23.78 %, 1.46 %, 16.51 and 217 mg kg⁻¹ respectively.

Key words: Garden waste, citrus peels, compost, ventilation types.

INTRODUCCIÓN

Los patrones de consumo y estilos de vida de la sociedad actual, han incrementado los volúmenes de residuos. Más del 50 % de los residuos generados en países de América Latina son orgánicos y de éstos, los residuos de jardinería constituyen un importante porcentaje. En la actualidad, los municipios no cuentan con planes de manejo que permitan minimizar y valorizar los residuos y son confinados de manera inadecuada en tiradero a cielo abierto, constituyendo un factor de producción de gases con efecto invernadero. Por tanto, es necesario contar con soluciones viables que permitan un manejo ambientalmente adecuado de los residuos. El manejo de los residuos orgánicos tratados mediante el composteo, plantea una alternativa viable a ser evaluada en los diferentes niveles de la sociedad. El compostaje aerobio es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de los residuos orgánicos a un material húmico estable conocido como composta y que se utiliza como un producto mejorador de suelo (Tchobanoglous *et al.* 1998). Algunos estudios se han enfocado en encontrar técnicas rápidas y eficientes utilizando residuos de jardín mezclados con otros residuos como las heces de los animales, residuos de alimentos o agroindustriales (Benito *et al.* 2003; Brewer & Sullivan 2003; Cayuela *et al.* 2006). De ahí que en algunos Campus Universitarios han realizado estudios para tratar sus propios residuos (Márquez-Haces 2003; Armijo de la Vega *et al.* 2006; Maldonado 2006). Para alcanzar la sustentabilidad ambiental es de suma importancia considerar la aplicación de métodos biotecnológicos que reduzcan el volumen y favorezcan la reutilización de los residuos (Diorio *et al.* 2003; Dede *et al.* 2006). Ciertos estudios han demostrando las ventajas del composteo como una transformación biológica de los residuos orgánicos y el eficiente manejo de ellos (Spanos *et al.* 1998; Koivula *et al.* 2000, Brewer & Sullivan 2003; Cayuela *et al.* 2006). Existe una amplia variedad de métodos para degradar la materia orgánica, entre los que se tiene la técnica tradicional de volteo manual (VM) y la de aireación forzada (AF) (Willson *et al.* 1980; Flores 2001; Misra & Roy 2003). Actualmente, el método de AF permi-

te disminuir el tiempo del proceso de degradación, controlando mejor la temperatura del sistema, además de reducir la mano de obra y los costos que ésta implica. Determinados estudios han utilizado la AF para degradar diferentes componentes orgánicos como los residuos de alimentos (Tiquia 2002; Chikae *et al.* 2006) y de jardinería (Brewer & Sullivan 2003; Benito *et al.* 2004; Cayuela *et al.* 2006). La etapa de maduración del material en degradación está relacionado con el grado de descomposición de las sustancias orgánicas fitotóxicas producidas durante la etapa de composteo (Brinton & Trankner 1992; Wu *et al.* 2000; Benito *et al.* 2003). El pH y la conductividad eléctrica han sido empleados para determinar la calidad de la composta final (Tiquia & Tam 2002; Fonstad *et al.* 2003; Cabañas-Vargas *et al.* 2005; Tognetti *et al.* 2007), así como la evolución de CO₂, la germinación de semillas y la concentración de carbono orgánico soluble (Wu *et al.* 2000). Bari *et al.* (2000) y Sauri & Castillo (2002), indican que la temperatura es un parámetro importante en el control y monitoreo del proceso de composteo. La relación C/N es otro parámetro usado para indicar que la degradación de la materia orgánica se ha estabilizado, se considera que la relación al final del proceso dependiendo del material orgánico degradado debe estar entre 15 a 20 (Pascual *et al.* 1997; Bernal *et al.* 1998b; Tiquia *et al.* 2002). El objetivo de este trabajo, fue comparar dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica conformada con residuos de jardinería y cáscara de cítricos. Los resultados de esta investigación, promoverá futuras investigaciones modificando tiempo de aireación, periodicidad de volteo manual así como el uso de otros residuos orgánicos, de igual forma contribuirá para que responsables del manejo integral de los residuos en instituciones públicas, privadas tengan elementos para la toma de decisión que aprueben un tratamiento rápido y eficaz de la fracción orgánica que se biodegrada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento, se realizó de octubre de 2006 a febrero de 2007 con una duración total de 120 d en el Campus de la División Académica de Cien-

cias Biológicas (DACBIol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), que se encuentra ubicada en las coordenadas 17° 59' 26.8" Norte y 92° 58' 25.6" Oeste. Los materiales utilizados en el estudio fueron residuos de jardín (hojas, ramas y pasto) y residuos de cítricos (cáscaras de naranja y toronja) recolectados en la DACBIol y una frutería de la Ciudad de Villahermosa respectivamente. La operación de compostaje estuvo constituida de tres pasos:

Almacenamiento y trituración (preprocesamiento)

Los residuos después de ser recolectados, se transportaron a un almacén ubicado cerca del área experimental, se cubrieron con un plástico negro para evitar ser mojados por las lluvias. Posteriormente se trasladaron al área de trituración, donde se molieron con una trituradora de desechos orgánicos marca Evans, de 1.5 H. P. y una trituradora de pasto y forrajes de 7.5 H. P. marca Cremasco, el tamaño de las partículas obtenidas oscilaban entre 3 y 6 cm, el material triturado se almacenó en bolsas de polietileno.

Construcción de las pilas

Con los residuos triturados, se construyeron dos pilas, una que fue tratada con aireación forzada (pila estática), y otra con volteo manual periódico; cada pila tenía 1 500 kg de residuos de jardinería y 220 kg de cáscaras de cítricos, un total de 1 720 kg residuos por pila. Las medidas de cada pila fueron 5.2 m de largo, 2.5 m de ancho y 1.4 m de alto, con una pendiente del 1 %. Se colocó una membrana de polietileno en la base de cada pila para controlar el volumen del material, evitar la lixiviación y la infiltración de humedad del suelo, este plástico alcanzó a cubrir el material por la parte superior, manteniendo la temperatura del sistema, evitando pérdida de agua por evaporación y disminuyendo la pérdida de nitrógeno orgánico.

Manejo de las pilas, para promover la descomposición de la materia orgánica

Aireación forzada (AF). La aireación forzada se llevó a cabo dentro de la pila estática de la siguiente

manera, se instaló una red de tubos de PVC hidráulico de 4 pulg de diámetro, unidos entre sí con una entrada que permitía acoplarle un soplador de $\frac{1}{4}$ de HP a una altura de 50 cm sobre el primer tendido de material a compostear. Los tubos tenían perforaciones de 5 mm de diámetro, a una distancia de 10 cm entre ellos, y aseguraron la circulación del aire por toda la tubería.

Durante los cuatro meses que duró el proceso de degradación, se suministró diariamente dos veces aire a la pila por 20 min, dejando un espacio de 30 min entre cada aireación. Debido a la compactación que se fue presentando, fue requerido hacer algunos volteos para que el material perdiera compactación, ya que era una causa de inhibición del proceso. El primer volteo se dio a los 14 d, los dos siguientes volteos los días 40 y 68 y debido a que el grado de compactación aumentaba a causa de la fragmentación del material, se realizaron en los últimos tres volteos (días 83, 96 y 110).

Volteo manual (VM). Este, se llevó a cabo en la pila de volteo periódico, se realizaron dos veces a la semana, el fin era acelerar el proceso mejorando la aireación del material. El total de volteos para este tratamiento fue de 32 veces al finalizar el proceso.

Análisis de las características fisicoquímicas de la composta

Toma de la muestra. Las muestras fueron tomadas de la siguiente manera:

Cada pila, se dividió en cuatro secciones paralelas entre sí, las secciones se dividieron en cinco partes, se tomaron cinco muestras de 200 g, una de cada parte, se consideró en la toma de la muestra que la altura y profundidad fueran las mismas (Benito *et al.* 2003), se homogenizaron las muestras, conformando una muestra compuesta, ésta se almacenó en una bolsa plástica marcada con el nombre de la muestra compuesta (Pérez 2005; Dell' Abate *et al.* 2000). De igual forma se hizo para las demás secciones de ambas pilas. Posteriormente, se transportaron al laboratorio para su análisis. Se determinaron Humedad, pH, Conductividad eléctrica, Materia orgánica, y Carbono orgánico. Este muestreo se realizó cada semana, durante los 120 d que

duró el experimento.

Para la determinación del Nitrógeno total y Fósforo, se utilizaron los remanentes de las muestras de los análisis anteriores previamente secos y triturados, estos análisis se realizaron 5 veces durante los 120 d, al inicio del proceso (día 1), al final del proceso (día 120), y durante el proceso (día 32, 60 y 88), esto se debe a que sólo se buscaba obtener un comportamiento de la dinámica del Nitrógeno total y Fósforo durante el proceso.

Para medir la temperatura, se tomaron tres lecturas en tres puntos (dos de los costados y una de en medio) de cada sección, en ambas pilas, este monitoreo se hizo durante toda la fase experimental (120 d).

Caracterización fisicoquímica

Los parámetros fisicoquímicos (Humedad, pH, Conductividad eléctrica y Materia orgánica) se determinaron en el Laboratorio de Química de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. La Temperatura se tomó en el lugar del experimento. Los análisis de Nitrógeno total y Fósforo se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas (LASPA) del Colegio de Posgraduados Campus Tabasco. Todos los análisis fueron de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Anónimo 2002).

Temperatura. Se determinó con termómetros de mercurio en la escala de -10 a 100 °C.

Humedad. El porcentaje de Humedad se determinó por el método gravimétrico, la muestra fue secada en estufa con aire forzado a 105 °C durante 24 h y pesada en balanza analítica.

pH. Se preparó una mezcla de 1:5 (peso volumen⁻¹) de la muestra en agua, se agitó y se dejó reposar (Benito et al. 2003). Para la determinación del pH se utilizó un potenciómetro Denver Instrument UB-10.

Conductividad eléctrica. Con la preparación anterior se realizó la medición de la conductividad eléctrica con un Conductivímetro Hanna Instruments.

Materia orgánica. Del material seco resultante en la medición de Humedad se utilizó 3.5 g para la determinación de la Materia orgánica. La Materia orgánica se determinó por el método de combustión

a 550 °C durante dos horas y media en una mufla (Brewer et al. 2003; Cayuela et al. 2006).

Carbono orgánico. La determinación del Carbono orgánico se obtuvo por medio de una relación entre la Materia orgánica y un factor indicativo de la cantidad de carbono orgánico presente en dicha materia (Ryng et al. 1992; Sauri & Castillo 2002; Pérez 2005).

$$CO = \frac{\% \text{ Materia orgánica}}{1.8}$$

Nitrógeno total. El nitrógeno total se determinó mediante la técnica Microkjeldhal.

Fósforo. El Fósforo disponible se determinó mediante la técnica de Olsen.

Análisis estadísticos de las variables

Los datos de los parámetros fisicoquímicos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), y análisis de correlación múltiple para ello se usó el paquete estadístico SAS versión 6.12 para Windows (Anónimo 1999). Para la comparación de medias entre tratamientos se usó la prueba de t de Student.

RESULTADOS

La Tabla 1, muestra los valores encontrados en los parámetros evaluados con el tratamiento de Aireación Forzada y Volteo Manual.

Los valores de Temperatura al inicio del experimento fueron de 67.25 y 53.5 °C en los tratamientos AF y VM respectivamente, debido a que el material de jardinería tenía varios días de haber sido cortado y mantenía una humedad del 45 %. Se observó descensos de temperatura el día 40, esto condujo a incrementar el contenido de agua en zonas secas en las pilas. En los días posteriores aumentó la temperatura, el día 60 fue mayor en la pila del tratamiento de VM con un valor de 58.5 °C al de 50 °C del VF.

En los siguientes días se presentó un descenso gradual de la temperatura siendo muy semejantes entre los tratamientos. Las diferencias observadas entre los tratamientos al final del experimento no fueron estadísticamente significativas.

Tabla 1. Valores encontrados en los parámetros evaluados con el tratamiento de Aireación Forzada y Volteo Manual.

Table 1. Values of the evaluated parameters in the Forced Aeration treatment and the Manual Turn Around treatment.

Tiempo (d)	T (AF) (°C)	T (VM) (°C)	H (AF) (%)	H (VM) (%)	CE (AF) (dS m ⁻¹)	CE (VM) (dS m ⁻¹)	pH (AF)	pH (VM)	MO (AF) (%)	MO (VM) (%)	CO (AF) (%)	CO (VM) (%)	N (AF) (%)	N (VM) (%)	C/N (AF)	C/N (VM)	P (AF) (mg kg ⁻¹)	P (VM) (mg kg ⁻¹)
1	67.25	53.5	63.76	65.31	1.58	1.85	8.02	8.2	56.77	59.86	31.54	33.25	1.05	1.16	28.6	28.71	209	303
11	53.42	58.67	60.45	61	1.18	1.04	8.42	8.62	57.38	58.65	31.77	32.58						
18	63.92	56.42	64.04	61.14	0.92	1.13	8.63	8.57	51.25	49.54	28.47	27.52						
25	56.75	58.42	66.24	60.61	0.96	1.15	8.57	8.65	48.7	51.92	27.05	28.85						
32	49.08	51.75	67.35	61.11	0.86	1.15	8.61	8.76	45.58	51.54	25.32	28.64	1.1	1.19	24.08	24.07	245	302
39	41.33	44.08	66.01	60.35	0.89	1.06	8.49	8.69	50.06	54.06	27.81	29.61						
46	51	48	61.23	58.77	0.85	1.11	8.78	8.89	40.1	49.21	22.28	27.34						
53	52.83	45.67	64.02	59.36	0.95	0.92	8.91	9.17	41	48.55	22.78	26.97						
60	50	58.5	64.9	61.25	0.92	0.89	9.1	9.21	43.97	48.22	24.42	26.79	1.16	1.3	21.23	20.58	231	251
67	45.42	57.42	63.68	60.85	0.92	0.86	8.63	8.96	38.15	42.72	21.19	23.73						
74	47.67	53.92	60.25	60.22	1.25	1.11	8.46	8.39	36.44	41.7	20.24	22.18						
81	47.58	49.92	60.49	61.3	1.23	1.08	8.58	8.73	39.28	42.86	21.82	23.82						
88	44.67	45.5	59.09	62.96	1.34	0.95	8.26	8.55	40	43.61	22.22	24.23	1.22	1.11	19.62	22.53	203	179
95	43	43.25	59.9	64.4	1.47	0.94	8.31	8.53	41.84	46.38	23.24	25.77						
102	38.33	40.17	59.37	63.34	1.44	0.94	8.33	8.68	41.22	42.59	22.9	23.66						
109	38.33	39.5	59.78	64.71	1.46	0.93	8.18	8.47	39.47	43.73	21.92	24.29						
116	36.5	37	56.96	65.31	1.76	1.03	8.04	8.48	38.21	43.56	21.23	24.2						
120	36.67	36.33	57.22	64.74	1.73	1	7.95	8.23	39.27	42.8	21.82	23.78	1.21	1.46	18.7	16.51	277	217

T = Temperatura; H = Humedad; CE = Conductividad eléctrica; pH = Potencial de hidrógeno; MO = Materia orgánica; CO = Carbono orgánico; N = Nitrógeno; C/N = Relación Carbono/Nitrógeno; P = Fósforo.

La Humedad de los materiales inicialmente fue de 45 %, se le adicionó agua para llevarlo a un valor cercano al 60 %, al inicio del experimento en ambos tratamientos fue 63.76 % para AF y 65.31 % para el VM. A las pilas del tratamiento de aireación forzada se les suministró agua a causa del descenso de temperatura y áreas secas presentado hacia el día 25. Al final del proceso no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos.

La conductividad eléctrica presentó valor inicial de 1.58 y 1.85 dS cm⁻¹ para AF y VM respectivamente. Al paso de los días, se presentó un incremento en el tratamiento AF a 1.73 y un descenso en VM hasta 1.000 dS cm⁻¹. Las diferencias entre los tratamientos fueron estadísticamente significativas.

El pH, se mantuvo alcalino durante todo el proceso; mostró ligeras diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos al final del proceso ($p \leq 0.01$), siendo de 8.23 y 7.95 para el VM y AF respectivamente. La correlación con la conductividad eléctrica fue de 0.7084.

La materia orgánica, mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos siendo la degradación de materia orgánica de 43 y 39 % en los tratamientos de AF y VM respectivamente. Se demostró una correlación directa entre la temperatura con la materia orgánica, lo cual no demuestra que la presencia de las temperaturas altas, eviden-

cian la actividad microbiana sobre los residuos orgánicos.

El Nitrógeno total se incrementó significativamente durante el experimento. Con aumentos del 15 y 26 % en AF y VM respectivamente.

La relación C/N disminuyó significativamente durante el experimento 65 y 57 % en los tratamientos AF y VM respectivamente, aunque no se observó diferencias entre los tratamientos los cuales mantuvieron valores cercanos de 19 y 17.

La dinámica del Fósforo fue diferente entre tratamientos, mientras en AF aumentó un 32 %, en el tratamiento de VM descendió un 40 %, las diferencias fueron estadísticamente significativas ($p \leq 0.01$).

DISCUSIÓN

Las temperaturas en el rango de termofílicas encontradas en los primeros 20 d coinciden con el estudio realizado por Brewer & Sullivan (2003), quienes obtuvieron temperaturas en el rango de 65-75 °C, siendo éstas temperaturas típicas de la etapa termofílica durante los primeros 22 d del proceso. Un estudio realizado por Nakasaki *et al.* (2005) mostró que cuando la temperatura es de 60 °C desde el inicio del proceso se logra una rápida mineralización (Figura 1).

El mantener altas temperaturas (mayores a 60 °C), también indica la destrucción de microorganismos como los patógenos y la inhibición de la germinación de semillas indeseables que podrían causar problemas en la composta en el momento de darle un uso (Sauri & Castillo 2002; Benito *et al.* 2005; Defrieri *et al.* 2005). Este comportamiento fue similar al reportado por Cabañas-Vargas *et al.* (2005) quienes en el tratamiento de VM observaron temperaturas por encima de los 50 °C alrededor de los primeros 50 d del proceso.

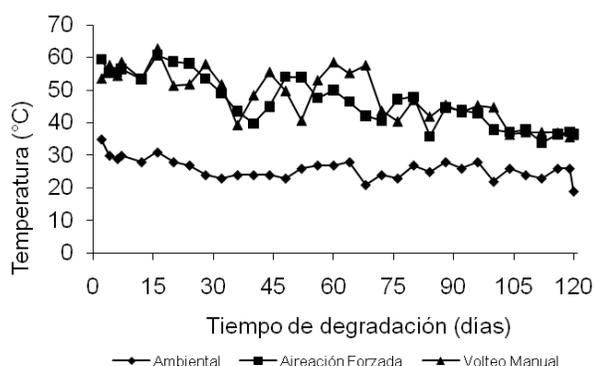


Figura 1. Dinámica de la Temperatura en los tratamientos evaluados.

Figure 1. Dynamics of the temperature in the evaluated treatments.

La temperatura en ambos tratamientos presenta fluctuaciones durante el proceso, hasta que llega el tiempo en que se estabiliza, esto se debe al proceso de degradación de la materia orgánica. Después del día 96, la temperatura en la pilas no supera los 40 °C. De acuerdo con Sauri & Castillo (2002) la estabilidad de la composta se alcanza cuando la temperatura de cada tratamiento se aproxima a la temperatura ambiente al cual están sometidas, esto se presentó a partir del día 105 del proceso.

Humedad, Conductividad eléctrica y pH

Ambos tratamientos iniciaron con valor de humedad apropiado para los procesos microbiológicos según Cabañas-Vargas *et al.* (2005), quienes indican que para una adecuada actividad microbiana debe permanecer alrededor de 60.0 %. Un factor que ayudó a controlar la humedad de los sistemas,

fue el utilizar la membrana de polietileno, evitando pérdidas más altas de agua por evaporación o inundaciones por precipitación en los días de lluvia.

La disminución de la conductividad eléctrica para ambos sistemas en los primeros días, se debió a la transformación de compuestos orgánicos complejos en formas más simples que pueden consumir algunas moléculas iónicas según Hassouneh *et al.* (1999). En ambos tratamientos la conductividad eléctrica aumentó a partir del día 67 del proceso indicando la formación de compuestos inorgánicos causada por la mineralización de la materia orgánica, y el incremento en la concentración de sales por la pérdida de peso en las pilas (Paredes *et al.* 2000; 2001; Conghos *et al.* 2003; Tognetti *et al.* 2007). Según la Norma Chilena Oficial 2880 (Anónimo 2005), una composta clase A es cuando presenta un valor de la conductividad eléctrica menor a 3 dS m⁻¹, estas compostas son productos de buena calidad y no presentan restricciones de uso. El valor de la conductividad eléctrica para ambos tratamientos fue menor a este valor, 1.73 dS m⁻¹ para AF y 1.0 dS m⁻¹ para VM. La conductividad eléctrica presentó una diferencia significativa entre los tratamientos ($p \leq 0.001$) y durante el proceso estuvo correlacionada con el pH, materia orgánica y carbono orgánico ($p \leq 0.001$).

En los tratamientos el aumento del pH está asociado a las altas temperaturas presentadas en la etapa termofílica principalmente por la acción metabólica de algunos tipos de ácidos como los carboxílicos y los grupos fenólicos; además de la mineralización de la materia orgánica que puede producir amonio, aumentando así el pH (Bernal *et al.* 1998a; Paredes *et al.* 2000; 2001; Márquez-Haces 2003). Al empezar a disminuir la temperatura para ambos tratamientos alrededor de los primeros 60 d, el valor del pH también disminuye a partir de este día. Chikae *et al.* (2006), obtuvieron un aumento continuo de pH durante la etapa biooxidativa en los primeros 40 d del proceso mostrando luego un decremento hasta el final de este. El comportamiento presentado por la temperatura fue similar. Otros estudios indican que aparentemente valores de pH básicos se deben a la degradación de ácidos grasos de cadenas pequeñas y a la producción de gas amonio NH₃ (Nakasaki *et*

al. 2005; Tognetti *et al.* 2007). La posterior disminución del pH y su estabilización es atribuida a la oxidación del amonio por nitrificación (Tognetti *et al.* 2007).

Materia orgánica y Carbono orgánico

En ambos tratamientos la mayor degradación de la materia orgánica se llevó a cabo en los primeros 67 d del proceso, indicando la biooxidación de los compuestos más biodisponibles para los microorganismos (Figura 2). En la misma figura se observa que la degradación de la materia orgánica presentó un comportamiento paralelo al de temperatura, de acuerdo con Hassouneh *et al.* (1999), la mayor degradación se da en la etapa termofílica. Como consecuencia de la degradación de la materia orgánica se producen compuestos inorgánicos que a su vez aumentan el valor de la conductividad eléctrica durante el proceso (Bernal *et al.* 1998a). Bernal *et al.* (1998a), obtuvieron una degradación de 21.0% durante 105 días; mientras Defriere *et al.* (2005) en 126 d alcanzó una degradación del 44.0%. Benito *et al.* (2003), determinaron durante 120 d una pérdida de materia orgánica del 28.0%. Por lo anterior, se puede decir que la reducción de la materia orgánica en los dos tratamientos es aceptable debido a que este tipo de material es difícil de degradar (39.3 y 42.8% para AF y VM, respectivamente).

La lenta degradación mostrada en los últimos 15 d parece indicar el agotamiento de materiales de carbono simple, quedando compuestos con estructuras más complejas y de difícil transformación. Esto indica el inicio del proceso de humificación (Márquez-Haces 2003).

Nitrógeno, Relación C/N y Fósforo

El Nitrógeno en ambos tratamientos tuvo la tendencia a aumentar durante el proceso, el mismo comportamiento encontraron Brewer & Sullivan (2003) en su estudio, estos resultados concuerdan con el estudio de Pérez (2005). Para Bernal *et al.* (1998a), la concentración de Nitrógeno incrementa por la fuerte degradación de los compuestos orgánicos presentes, lo cual reduce el peso del material composteado y concentra la cantidad de nitrógeno presente. En el tratamiento de VM en el día 88 se

observa una disminución en la concentración del Nitrógeno. Madrid & Castellanos (1998) y Benito *et al.* (2003) indican que la pérdida de Nitrógeno se debe a la volatilización de Amoníaco como consecuencia de los valores altos de pH. Brewer & Sullivan (2003), encontraron para los mismos días de proceso un comportamiento similar para dicho tratamiento.

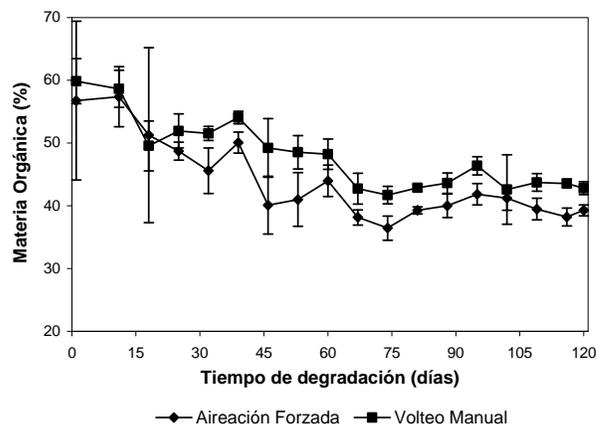


Figura 2. Dinámica de la degradación de la Materia Orgánica en los tratamientos evaluados (las barras representan un error estándar).

Figure 2. Dynamics of the decomposition of the organic matter in the evaluated treatments (the bars indicate one standard error).

Los valores de C/N al inicio del proceso fueron 28.60 para AF y 28.71 para VM (Figura 3). Según Márquez-Haces (2003), una relación C/N inicial es difícil determinar debido a la heterogeneidad de los residuos. Sin embargo, se puede considerar una relación entre 25 y 35 apropiada al inicio del proceso. La relación C/N presentó una correlación significativa con la temperatura ($p \leq 0.01$). La relación C/N para ambos tratamientos disminuyó considerablemente hasta el día 60, esto se dio principalmente durante la fase biooxidativa debido a la alta degradación de la Materia orgánica (Benito *et al.* 2003). Para el tratamiento de VM la tendencia a disminuir en la relación de C/N se vio afectada por la pérdida de Nitrógeno presentada para el día 88 del proceso aumentando el valor de esta relación. El valor de la relación C/N al final del proceso fue de 18.7 para AF y de 16.5 para VM. Defrieri *et al.* (2005), alcanzaron un valor final de 13 para residuos orgá-

nicos composteados con estiércol de animales. En el estudio realizado por Sauri & Castillo (2002), obtuvieron valores entre 17 y 19 para la relación de C/N en compostas realizadas con residuos de cáscara de naranja y otros sustratos orgánicos. Brewer & Sullivan (2003), encuentran en su estudio que la relación fue un buen indicador para el composteo de residuos de jardín obteniendo un valor final de 12, mientras Tiquia *et al.* (2002) alcanzaron un valor de 20.1 para la relación de C/N en el composteo de residuos de jardinería considerándolo como un valor que indica la estabilidad y madurez del producto final. Tiquia *et al.* (2002), plantean un valor de 20, por su parte Bernal *et al.* (1998b) proponen que esta relación (C/N) sea menor a 20, mientras Pascual *et al.* (1997), consideran madura una composta cuando la relación se encuentra entre 15 y 25.

El Fósforo en el tratamiento de AF presentó una tendencia a incrementarse durante el proceso, mientras que en el tratamiento de VM el mismo elemento fue decreciendo. En su estudio Reyes (1991) y Kato *et al.* (2005) mencionan que el aumento gradual de Fósforo durante el proceso de composteo es resultado del efecto de la concentración causada por la biodegradación. Lo anterior explica el aumento del 35.0% en el contenido de Fósforo presentado al final del experimento en el tratamiento de AF. En el tratamiento de VM se presentó una pérdida de 28.0% de Fósforo. En el estudio realizado por Álvarez *et al.* (2001) obtuvieron una pérdida de 10.0% y señalan la pérdida de Fósforo como la posibilidad

de que haya pasado a formas no disponibles, posiblemente por la presencia de suelo en la composta producto de la poda de los residuos de jardinerías.

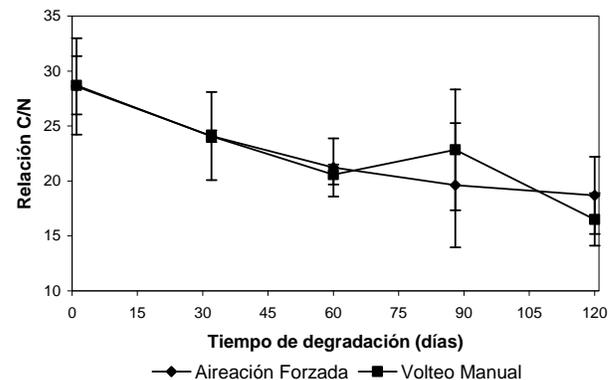


Figura 3. Dinámica de la relación C/N en los tratamientos evaluados (las barras representan un error estándar).

Figure 3. Dynamics of the ratio C/N in the evaluated treatments (the bars indicate one standard error).

Estos resultados indican que el comportamiento de la relación C/N, en los dos métodos evaluados es similar. Es necesario continuar con más estudios que permitan tener elementos para definir el tiempo final de la madurez en ambos tratamientos.

Asimismo, se deben considerar otras variables que permitan valorar que el proyecto sea económicamente viable, tecnológicamente aplicable, ambientalmente sustentable y socialmente aceptable.

LITERATURA CITADA

- Anónimo (1999) Paquete estadístico SAS versión 6.12 para Windows (CD) SAS Institute, Inc.
- Anónimo (2002) Norma Oficial Mexicana. NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis Diario Oficial, Segunda sección 85 pag.
- Anónimo (2005) Norma Chilena Oficial NCh 2880. Diario Oficial de la República de Chile.
- Álvarez MC, Palacios CO, Hoyos AA, Alcántar G, Castillo A (2001) Biotecnificación de solares familiares de las zonas bajas tropicales. Terra Latinoamericana. Ene-Mar 19(001): 37-46.
- Armijo de la Vega C, Ojeda S, Ramírez E, Quintanilla A (2006) Potencial de reciclaje de los residuos de una institución de educación superior: el caso de la Universidad Autónoma de Baja California. Ingeniería 10(3): 13-21.

- Bari QH, Koenig A, Guihe T (2000) Kinetic analysis of forced aeration composting-I Reaction rates and temperature. *Waste Management and Research* 18: 303-312.
- Benito M, Masaguer A, Moliner A, Arrigo N, Palma RM (2003) Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost. *Biol Fertil Soils* 37: 184-189.
- Benito M, Masaguer A, Antonio R, Moliner A (2004) Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. *Bioresource Technology* 96: 597-603.
- Benito M, Masaguer A, Moliner A, Antonio R (2005) Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Bioresource Technology* 97(16): 2071-6.
- Bernal MP, Cegarra J, Roig A, Sánchez-Monedero MA, Paredes C (1998a) Composting of organic wastes as a strategy for producing high quality organic fertilizers. 8th International Conference of the RAMIRAN Network. FAO European Cooperative. 171-182.
- Bernal, MP, Paredes C, Sanchez-Monedero MA, Cegarra J (1998b) Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology* 63: 91-99.
- Brewer LJ, Sullivan DM (2003) Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings. *Compost Science & Utilization* 11(2): 96-112.
- Brinton W, Trankner A (1992) Compost maturity as expressed by phytotoxicity and volatile organic acids. Report at the Biocycle, Albany NY.
- Cabañas-Vargas DD, Sánchez MA, Urpilainen ST, Kamilaki A, Stentiford EI (2005) Assessing the stability and maturity of compost at large-scale plants. *Ingeniería* 9(2): 25-30.
- Cayuela ML, Sánchez-Monedero MA, Roig A (2006) Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry* 41: 616-623.
- Conghos MM, Aguirre ME, Santamaría RM (2003) Biodegradation of sunflower hulls with different nitrogen sources under mesophilic and thermophilic incubations. *Biol Fertil Soils* 38: 282-287.
- Chikae M, Ikeda R, Kerman K, Morita Y, Tamiya E (2006) Estimation of maturity of compost from food wastes and agro-residues by multiple regression analysis. *Bioresource Technology* 97(16): 1979-1985.
- Dede OH, Köseoglu G, Özdemir S, Celebi A (2006) Effects of organic waste substrates on the growth of *impatiens*. *Turk J. Agric. For* 30: 375-381.
- Defrieri RL, Jiménez MP, Efron D, Palma M (2005) Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. *Agriscientia* XXII (1): 25-31.
- Dell'Abate MT, Benedetti A, Sequi P (2000) Thermal methods of organic matter maturation monitoring during a composting process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 61: 389-396.
- Diorio LA, Forchiassin F, Papinutti VL, Sueldo DV (2003) Actividad enzimática y degradación de diferentes tipos de residuos orgánicos por *Saccobolus saccoboloides* (Fungi, Ascomycotina). *Revista Iberoamericana de Micología* 20: 10-15.
- Flores D (2001) Guía Práctica N° 2 Para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos. Promoción del desarrollo sostenible II y Programa de gestión urbana. Coordinación para América latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. Ecuador 60 p.
- Fonstad TA, Meier DE, Ingram LJ, Leonard J (2003) Evaluation and demonstration of composting as an option for dead animal management in Saskatchewan. Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canadian Biosystems Engineering. 45-6.

- Hassouneh O, Jamrah A, Qaisi K (1999) Sludge stabilization by composting: a Jordanian case study. *Bio-process Engineering* 20: 413-421.
- Kato K, Miura N, Tabuchi H, Nioh I (2005) Evaluation of maturity of poultry manure compost by phospholipids fatty acids analysis. *Biol Fertil Soils* 41: 399-410.
- Koivula N, Hänninen K, Tolvannen O (2000) Windrow composting of source separated kitchen biowastes in Finland. *Waste Management and Research* 18: 160-173.
- Madrid C, Castellanos Y (1998) Efecto de activadores sobre la calidad de compost elaborados con cachaza y bagazo de la caña de azúcar. *Revista Venezolana* 1(2): 22-28.
- Maldonado L (2006) Reducción y reciclaje de residuos sólidos urbanos en centros de educación superior. *Ingeniería* 10(1): 59-68.
- Márquez-Haces M (2003) Estudio de la aceleración del compostaje de residuos de jardinería por incubación de hongos *Trichoderma* spp. Tesis de Maestría. Instituto de Minatitlan, Veracruz, 87 pp.
- Misra RV, Roy RN (2003) On-farm composting methods. FAO, Rome, 26 pp.
- Nakasaki K, Nag K, Karita S (2005) Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Management & Research* 23: 48-56.
- Paredes C, Roig A, Bernal MP, Sánchez-Monedero MA, Cegarra J (2000) Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol Fertil Soils* 32: 222-227.
- Paredes C, Bernal MP, Roig A, Cegarra J (2001) Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes. *Biodegradation* 12: 225-234.
- Pascual JA, Ayuso M, García C, Hernández T (1997) Characterization of urban waste according to fertility and phytotoxicity parameters, *Waste Management Research* 15(1): 103-112.
- Pérez MA (2005) Elaboración de abono orgánico a partir de cachaza y bagazo por composteo aeróbico. Tesis de Maestría Colegio de Posgraduados, Cárdenas, Tabasco, 104 pp.
- Reyes I (1991) Dinámica del fósforo en el aislamiento de algunos microorganismos en la mezcla pulpa de café - roca fosfórica. *Fac. Agron (Maracay)* 17: 397-408.
- Ryng R, Van de Kamp M, Willson GB, Singley ME, Richard TL, Colega JL, Gouin FR, Laliberty L, Day K, Murphy DW, Hoitink HAJ, Brinton WF (1992) On-farm Composting Handbook Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Ithaca, New York, Cornell University, 186 pp.
- Sauri MR, Castillo ER (2002) Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes. *Ingeniería Revista Académica* 6(003): 55-60.
- Spanos K, Skodras G, Koukos P (1998) Composting of organic residues COST Action E9 - Life cycle assessment of forestry and forest products - WG3: End of life - "Recycling, disposal and energy production" Meeting, November 8- 9, Hamburg, Germany, 6 pp.
- Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S (1998) Gestión integral de residuos sólidos. Mc. Graw Hill, España, 1107 pp.
- Tiquia SM, Tam NFY (2002) Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry* 37: 869-880.
- Tiquia SM, Wan JHC, Tam NFY (2002) Dynamics of yard trimmings composting as determined by dehydrogenase activity, ATP content, arginine ammonification, and nitrification potenti *Process Biochemistry* 37: 1057-1065.

- Tiquia SM (2002) Evolution of extracellular enzyme activities during manure composting. *Journal of Applied Microbiology* 92: 764-775.
- Tognetti C, Mazzarino MJ, Laos F (2007) Co-composting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality. *Biol Fertil Soils* 43: 387-397.
- Willson GB, Parr JF, Epstein E, Marsh PB, Chaney RL, Colacicco D, Burge WB, Sikora LJ, Tester CF, Hornick S (1980) Manual for composting sewage sludge by the Beltsville aerated-pile method. U.S. Department of Agriculture Beltsville, Maryland, EPA-60018-80-022, 82pp.
- Wu L, Ma LQ, Martinez GA (2000) Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *Journal Environmental Quality* 29: 424-429.

