

ESTUDIO COMPARATIVO DE CUATRO TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Comparative study of four biological treatments for the use of organic solid waste

 ¹ Janneth Jara-Samaniego*

 ² Estalin Mejía Hidalgo

 ³ Steven Ramos Romero

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.

² Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador.

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Decanato de Investigaciones, Riobamba, Ecuador.

* ljara@espoch.edu.ec

RESUMEN

Los residuos orgánicos provenientes de mercados de una mancomunidad de Ecuador, fueron sometidos a cuatro tratamientos biológicos: compostaje (T1): pila de 1050 Kg. de residuos; co-compostaje (T2): pila de 900 Kg. de residuos y 150 Kg. de paja, takakura (T3), pila de 300 Kg. de residuos y 50 Kg. de compost semilla y vermicompostaje (T4): cama de 1m² con 60 Kg. de residuos precompostados. Los residuos de mercado fueron triturados mecánicamente. Las pilas se colocaron en una nave techada. En los abonos orgánicos obtenidos, se determinó el pH (T1= 9,8; T2= 9,9; T3= 7,84 y T4= 8,01), la conductividad eléctrica en dSm-1 (T1= 4,43; T2= 4,57; T3= 2,19 y T4= 0,56), el porcentaje de materia orgánica (T1= 31,69; T2= 31,45; T3= 26,15 y T4= 25,32), los porcentajes de macronutrientes: nitrógeno (T1= 0,81; T2= 2,33; T3= 1,04 y T4= 2,34), fósforo (T1= 0,80; T2= 1,86; T3= 0,97 y T4= 2,00) y potasio (T1= 0,48; T2= 4,22; T3= 1,38 y T4= 3,76) y el porcentaje del índice de germinación (T1= 64,59; T2= 91,3; T3= 95,57 y T4= 100). Se empleó la herramienta estadística ANOVA y el Test de Tukey-b ($P < 0.05$). Los resultados indicaron que el vermicompostaje fue el mejor tratamiento.

Palabras claves: *abonos orgánicos, biomasa, medio ambiente, residuos de mercado, tratamientos biológicos.*

ABSTRACT

Organic waste generated in the markets of a community in Ecuador, was subjected to four biological treatments: composting (T1): a pile of 1050 kg of waste; co-composting (T2): a pile of 900 kg of waste and 150 kg of straw; takakura (T3): a pile of 300 kg of waste and 50 kg of seed compost and vermicomposting (T4): 1 m² bed with 60 kg of pre-composted waste. The market waste was mechanically shredded. The piles were placed in a semi-enclosed. In the organic fertilizers obtained, the pH (T1= 9.8; T2= 9.9; T3= 7.84 and T4= 8.01), electrical conductivity in dSm-1 (T1= 4.43; T2= 4.57; T3= 2.19 and T4= 0.56), percentage of organic matter (T1= 31.69; T2= 31.45; T3= 26.15 and T4= 25.32), percentage of macronutrients: nitrogen (T1= 0.81; T2= 2.33; T3= 1.04 and T4= 2.34), phosphorus (T1= 0.80; T2= 1.86; T3= 0.97 and T4= 2.00) and potassium (T1= 0.48; T2= 4.22; T3= 1.38 and T4= 3.76) and percentage of germination index (T1= 64.59; T2= 91.3; T3= 95.57 and T4= 100) were determined. The ANOVA statistical tool and the Tukey-b test were used ($P < 0.05$). The results indicated that vermicomposting was the best treatment.

Keywords: *organic fertilizer, biomass, environment, market waste, biological treatments.*

I. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos urbanos debido a las actividades antropogénicas marcadas por los cambios en los hábitos de consumo de la población, sigue en aumento. Cuando los residuos no son gestionados en forma correcta provocan serios problemas ambientales como la emisión de gases efecto invernadero, lixiviados, la presencia de vectores y la contaminación de los recursos agua, suelo y aire lo que incide en la salud de las personas. En los países latinoamericanos y en particular en Ecuador, la problemática se agudiza por la falta de recursos económicos y la escasa educación ambiental de la población. En el país, los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) de acuerdo a la ley, son los encargados de su correcta gestión. En esta investigación se trabajó con los residuos vegetales de los mercados de la mancomunidad de los cantones Colta, Guamote y Alausí ubicados en la provincia de Chimborazo. Estos residuos se caracterizan por tener altos porcentajes de materia orgánica, humedad y nutrientes (1). Un estudio previo realizado en un mercado de la misma provincia, reportó que los residuos tenían el 77,3% de materia orgánica y un contenido de macronutrientes de 2,5% de nitrógeno; 0,7% de fósforo y 3% de potasio (2). Estas características y su alta biodegradabilidad, hacen que los residuos vegetales de mercado sean los indicados para ser transformados mediante tratamientos biológicos como el compostaje, co-compostaje, takakura y vermicompostaje. Como producto final se obtienen abonos orgánicos que ayudan a mejorar la productividad de los cultivos y la fertilidad del suelo por la captura de carbono (3), contribuyendo a la seguridad alimentaria, la salud y la preservación del ambiente (4). Además, reducen los impactos ambientales permitiendo el reciclaje de nutrientes.

El compostaje es un tratamiento aerobio amigable con el ambiente, desarrollado mediante una tecnología de bajo coste que permite que los microorganismos presentes en los materiales biodegradables se transformen en compost: materia orgánica biológicamente estabilizada, desodorizada, libre de patógenos, rica en sustancias húmicas, fácilmente almacenable y aceptada comercialmente como fertilizante y enmienda orgánica (5,6). La calidad del compost depende, entre otros factores, del tipo de residuos sólidos orgánicos de partida. En este contexto, los residuos de mercado son heterogéneos y

húmedos lo que compostarlos directamente podría representar una desventaja frente a otros tratamientos biológicos.

El co-compostaje se da por la adición de un tipo o tipos diferentes de residuos orgánicos con el fin de mejorar las características del residuo original. En el caso de los residuos de mercado, se suelen añadir materiales secos con un alto contenido de carbono. Estos residuos se conocen como agentes estructurantes y su función es aumentar la porosidad de la pila, absorber la humedad, mejorar la aireación y ajustar la relación C/N brindando las condiciones que ayudan a obtener un abono de calidad (7). Entre los principales agentes estructurantes están las hojas secas, paja, cascarilla de arroz, rastrojo de cultivos, serrín, poda de árboles y residuos ricos en celulosa y material fibroso.

El método Takakura es un tipo de compostaje en el que se utilizan microorganismos que ayudan a descomponer los residuos orgánicos de manera rápida. El método fue creado por Koji Takakura, científico del laboratorio de Estudios Medioambientales (8). Este método se basa en la preparación de dos soluciones fermentadas empleando materiales disponibles en la zona de estudio que son inoculadas en cascarilla de arroz. El método presenta varias ventajas en comparación con otros tratamientos biológicos. La diferencia se debe al uso de fermentos de microorganismos los mismos que pueden ser aplicados en pequeñas camas o lechos de compostaje o en grandes plantas de tratamiento (9).

El vermicompostaje es un proceso que involucra la biooxidación, degradación y estabilización de residuos orgánicos en el que intervienen lombrices y los microorganismos propios de los residuos, en condiciones aerobias y mesófilas, obteniéndose materia orgánica estabilizada (10,11). Los microorganismos son los responsables de la degradación bioquímica de la materia orgánica, mientras que las lombrices ayudan a la fragmentación y acondicionamiento del sustrato para la actividad microbiológica (12,14). Las lombrices, generalmente *Eisenia fetida*, trituran los residuos sólidos modificando sus características físicas y químicas al reducir, de forma gradual, la relación C/N (15,16). Además, pueden reducir cantidades significativas de patógenos por la acción de sus enzimas digestivas (17). A diferencia del compostaje, en el que las

pilas se voltean para permitir la aireación, en el vermicompostaje, son las lombrices las que se desplazan en la pila creando micro túneles que permiten el paso de oxígeno. El abono obtenido se conoce como vermicompost o humus de lombriz; éste aumenta la actividad microbiana en el suelo ayudando al crecimiento de las plantas y actuando como supresores de infecciones y plagas favoreciendo la rehabilitación de suelos degradados (18–20).

Como se puede dimensionar a partir de la revisión bibliográfica, todos estos tratamientos permiten reciclar los residuos sólidos orgánicos en pequeñas y grandes cantidades, con tecnologías de bajo coste y de fácil implementación.

El objetivo de esta investigación fue realizar un estudio comparativo partiendo de residuos vegetales de mercado, sometidos a cuatro procesos biológicos: compostaje, co-compostaje, takakura y vermicompostaje, para determinar cuál es el mejor tratamiento que permita obtener abonos orgánicos que contribuyan de manera sostenible a la fertilidad de los suelos y a la obtención de cultivos sanos que garanticen la seguridad alimentaria.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de la investigación

La investigación se realizó en la nave cubierta de la Hacienda Agroecológica Totorillas, ubicada a 10 kilómetros del relleno sanitario de la mancomunidad de los cantones Colta, Guamate y Alausí. En este sentido, se ha tomado en cuenta el “Principio de proximidad”, un nuevo aspecto establecido por la Directiva Europea, que considera que el tratamiento de los residuos debe hacerse en un lugar cercano para impulsar la economía local, evitar los costos de transporte a sitios lejanos y disminuir los impactos ambientales asociados, reduciendo de esta manera la huella ecológica y luchando contra el cambio climático (21). Los análisis fisicoquímicos, químicos y biológicos se hicieron en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Residuos orgánicos vegetales

Se partió de residuos de mercado debido al alto porcentaje de materia orgánica. Los residuos

fueron clasificados en el relleno sanitario de la mancomunidad y transportados al lugar del tratamiento. Principalmente están formados por desperdicios de col, lechuga, cebolla, haba, arveja, papa, maíz, tomate, culantro, brócoli y frutas como plátano, fresa, naranja, papaya y manzana. Otros residuos empleados fueron: paja de monte y cascarilla de arroz, en dependencia del tratamiento realizado. Todos los residuos fueron triturados hasta obtener un tamaño de partícula entre 1 y 5 cm (Figura 1).



Figura 1. Residuos triturados.

Con la finalidad de que los tratamientos inicien con una relación C/N entre 20 y 30, se caracterizaron los residuos vegetales de mercado y la paja de monte (Tabla 1).

Parámetros	Residuos sólidos orgánicos	Paja
Carbono Orgánico (%)	44,03	45,38
Nitrógeno Total (%)	1,62	1,23
Humedad (%)	77,95	11,35
C/N*	27	30

*Se emplea la aplicación <https://compost.css.cornell.edu/calc/2.html>

Tabla 1. Caracterización de los residuos.

Pila de compostaje

Para el compostaje (T1) se empleó 1050 Kg. de residuos vegetales de mercado (relación C/N 27). Los residuos se colocaron sobre una superficie encementada y limpia formando una pila de 2,5 m. de base por 2,0 m. de ancho y 1,5 m. de altura (Figura 2 (a)). A lo largo del proceso se registró la temperatura, la humedad y el pH. El volteo fue manual y se realizó cuando la temperatura se aproximaba a la del ambiente. La humedad inicial fue superior al 70%. El tiempo de compostaje fue de 100 días y un período de maduración de 60 días.

Pila de co-compostaje

La pila (T2) se armó empleando 900 Kg. de residuos de mercado y 150 Kg. de paja de monte (relación C/N 30). Se colocó una primera capa de 20 cm. de paja, luego una capa de residuos y así sucesivamente hasta formar una pila de 1,5 m. de altura (Figura 2 (b)). Los parámetros controlados durante el proceso fueron los mismos que en el compostaje, al igual que la frecuencia de volteo. El proceso duró 160 días incluido el período de maduración.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Armado de la pila de compostaje, (b) Armado de la pila de co-compostaje.

En estos dos tratamientos se añadieron soluciones de microorganismos para ayudar a la activación de las pilas. Para esto se prepararon 2 baldes de 20 L. de solución utilizando 0,5 L. de gallinaza; 2 L de bosta de bovino; 0,5 L de compost maduro mezclados en 17 L. de agua sin cloro.

Pila de compostaje Takakura

Este tratamiento (T3) se dio en 3 fases: 1) Preparación de las soluciones dulce y salada con los ingredientes y cantidades indicados en la tabla 2.

Solución Dulce		Solución Salada	
Ingredientes	Cantidad	Ingredientes	Cantidad
Agua	5 L	Agua	5 L
Azúcar Morena	123 g	Sal	78 g
Yogurt	0,3 L	Frutas	1 500 g
Levadura	23 g	Verduras	454 g
Melaza	0,4 L		

Tabla 2. Preparación de las soluciones dulce y salada.

Después de 8 días en reposo, se procedió a filtrar la solución salada para retirar los residuos. 2) Preparación del compost semilla. Se mezcló 45 kg. de cascarilla de arroz con las soluciones salada y dulce. Como alimento de los microorganismos se añadió 1 Kg. de harina de trigo. Luego se agregó 0,5 Kg. de hojarasca y 5 Kg. de tierra negra recolectadas en el lugar. Se armó una pila y se cubrió con una malla para evitar la presencia de moscas. La humedad óptima fue de 50-60% y se ajustó adicionando agua. Se dejó 15 días para que los microorganismos se multipliquen. 3) Armado de la pila. Los 300 Kg. de residuos vegetales se mezclaron homogéneamente con el compost semilla hasta formar la pila (Figura 3). Durante el proceso se controlaron los mismos parámetros de los tratamientos T1 y T2. La fase biooxidativa duró 75 días y el período de maduración 60 días.



Figura 3. Armado de la pila mediante el método Takakura.

Cama de vermicompostaje

Para este tratamiento (T4) se empleó 60 Kg. de materia orgánica precompostada durante un mes, tomados del tratamiento T1. Previo al armado de la cama de vermicompostaje, se realizó la prueba de caja, que consistió en colocar 20 lombrices en 1 Kg. de los residuos precompostados con la finalidad de establecer la ausencia de toxicidad de los residuos, que se comprobó, en este caso, por la ausencia de mortalidad de las lombrices. Se armó una caja de madera de 1 m²; en la base se hicieron orificios para controlar el exceso de humedad y asegurar la oxigenación. Sobre la base de la caja se colocó 10

cm. de tierra negra, 1 Kg. de lombrices y se cubrió con 60 kg de materia orgánica precompostada (Figura 4). La humedad se ajustó añadiendo agua libre de cloro. Finalmente, la caja se cubrió con una malla para evitar la presencia de depredadores. El tratamiento duró en total aproximadamente 160 días.



Figura 4. Armado de la cama de vermicompostaje.

Una vez que los tratamientos concluyeron, los residuos fueron tamizados para eliminar las impurezas y los residuos sin compostar. En el caso del vermicompostaje, las lombrices retiradas fueron colocadas en nuevos residuos para continuar con la elaboración de abonos.

Control de calidad de los tratamientos

En todos los tratamientos se controló la temperatura, la humedad y el pH 3 veces por semana. La temperatura se registró con un termómetro digital marca Hanna; la humedad y el pH con un higrómetro de campo. Al inicio y al final de los tratamientos y en cada volteo (T1, T2 y T3), se tomaron muestras de 1Kg. empleando el método del cuarteo. Con las muestras secas y molidas se determinó el porcentaje de materia orgánica (MO) por el método gravimétrico empleando una mufla VULCAN A-550 a temperaturas de 430 °C por 24 horas. El pH se registró con un pHchímetro BOECO BT-675 y la conductividad eléctrica (CE) con un conductímetro BOECO CT-676; preparando soluciones acuosas 1:10. La determinación de los porcentajes de macronutriente N, P, K y del índice de germinación (IG) se realizó únicamente en las muestras iniciales y finales. El nitrógeno total (Nt) se determinó por el método de Dumas, El fósforo (P_2O_5) mediante colorimetría y el potasio (K_2O) por absorción atómica. Para el IG se emplearon semillas de berro (*Lepidium sativum* L). En total se tomaron 24 muestras (T1: 7 muestras, T2: 7 muestras, T3: 7 muestras T4: 3 muestras). Todos los análisis se hicieron por triplicado y se reportaron sobre base

seca.

Diseño experimental

Se aplicó un análisis de varianzas de un factor con cuatro tratamientos (ANOVA unidireccional), para determinarse si existe una diferencia significativa entre las medias de las tres réplicas de los tratamientos de compostaje, co-compostaje, compostaje por el método Takakura y vermicompostaje se utilizó el Test de Tuky-b ($P < 0.05$).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución de la temperatura

En el Gráfico 1, se puede observar que la temperatura en los tratamientos T1 y T2, iniciados al mismo tiempo, ascendió rápidamente hasta alcanzar valores cercanos a los 40° C y 50° C respectivamente; esto es un indicativo de una rápida degradación de la materia orgánica. Un incremento similar fue observado en experiencias de compostaje de residuos vegetales (22,23). Sin embargo, la temperatura en la pila de compostaje (T1) no se mantuvo y descendió, posiblemente por el exceso de humedad. Éste es un parámetro clave para mantener un efectivo proceso de compostaje (24), pues los poros se tapan y no permite el paso de oxígeno, indispensable para la actividad microbiana en tratamientos aerobios. El descenso de temperatura en el tratamiento T2, fue menos drástico. Para ayudar a la reactivación de estas pilas, el día 14 fueron volteadas y se procedió a agregar una solución enriquecida de microorganismos; con esto se logró que las pilas alcancen una temperatura máxima de 58° C y 52° C respectivamente manteniéndose en la etapa termófila durante aproximadamente 14 días, lo cual aseguró la máxima eliminación de microorganismos patógenos de acuerdo a los requerimientos relacionados con la higienización del compost.

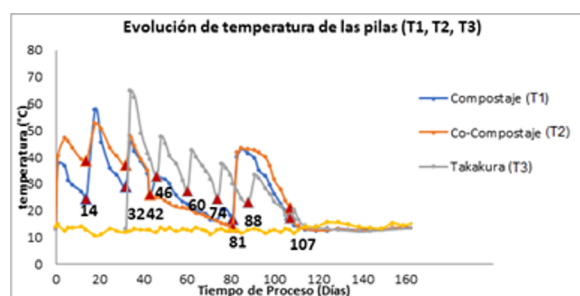


Gráfico 1. Evolución de la temperatura de las pilas.

Debido a que en el tratamiento T3 se utilizaron residuos precompostados, los perfiles de temperatura se observan a partir del día 30. La subida de la temperatura fue bastante rápida alcanzando los 65° C y manteniéndose en la etapa termofílica por aproximadamente 30 días debido a las soluciones enriquecidas con microorganismos.

Los perfiles de temperatura muestran un aumento de las mismas después de los volteos, pues las pilas se reactivan con el suministro de oxígeno, la corrección de la humedad y la homogenización de los materiales de las pilas. A partir del día 100, la temperatura de los 3 tratamientos se aproximó a la del ambiente, un indicativo de que concluyó la fase biodegradativa. La fase de maduración de todos los tratamientos fue de 60 días.

En el caso del vermicompostaje, la temperatura de la cama se mantuvo entre 15° C y 28° C. Según (25) en un estudio realizado para medir la capacidad reproductiva de la Eisenia foetida, observaron temperaturas promedio de 23° C.

Evolución de pH

En el Gráfico 2 se observa que los tratamientos T1 y T2 presentaron un incremento significativo de pH llegando a valores máximos de 9,8 y 9,9 respectivamente, debido principalmente a la degradación de compuestos como ácidos carboxílicos y grupos fenólicos y a la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos a amonio (26). Al final de estos tratamientos el pH bajó, pero sigue siendo básico por lo que se recomendaría utilizarlos en mezclas con compost de pH neutro o ligeramente ácido.

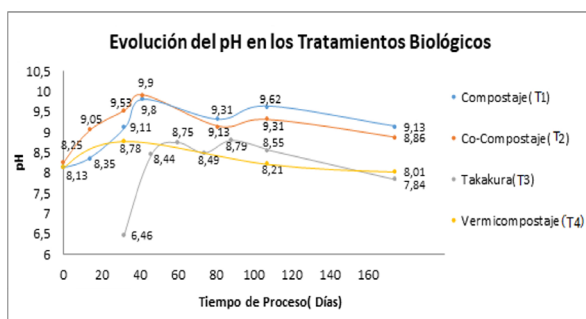


Gráfico 2. Evolución de pH.

Por otro lado, el compost realizado con el método Takakura (T3) y vermicompostaje (T4) presentaron pH ligeramente básicos (7,84 y 8,01

respectivamente). Según (27), los valores de pH óptimos para abonos orgánicos se ubican entre 6,5 y 8,5 por lo que estos tratamientos cumplirían con lo especificado.

Evolución de la Conductividad Eléctrica (CE)

La CE no afecta significativamente el proceso de compostaje, pero influye en la calidad final de los productos al ser un indicativo de la presencia de sales minerales en los abonos orgánicos.

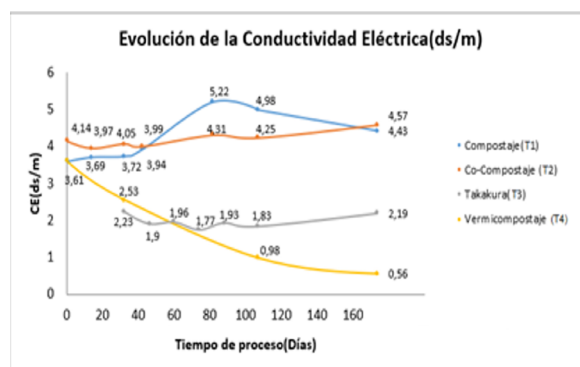


Gráfico 3. Evolución de la Conductividad Eléctrica.

En el Gráfico 3, se puede observar que en los tratamientos T1 y T2 la CE aumentó con respecto a los valores iniciales; esto se debe a la mineralización de la materia orgánica. Sin embargo, en los tratamientos T3 y T4 la CE disminuyó, lo que indica una pérdida de sales mediante los lixiviados por un exceso de humedad (28). La CE de todos los abonos se encontraron dentro del rango establecido en la legislación española para enmiendas de suelo y abonos orgánicos (29).

Evolución de la Materia Orgánica (MO)

Conforme avanzaron los procesos de elaboración de los abonos, la materia orgánica se fue degradando tal como se puede apreciar en el Gráfico 4. El tratamiento con mayor pérdida de MO es el vermicompostaje (T4) pues parte con un valor inicial de 73,95% y termina con el 25,32% de MO. Los microorganismos y las lombrices forman una asociación simbiótica con beneficios mutuos (30); las lombrices, al romper los residuos, ayudan a crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano aumentando la superficie de contacto y la colonización, acelerando la mineralización de la MO (12); mientras que los microorganismos proveen nutrientes esenciales y MO a las lombrices (31).

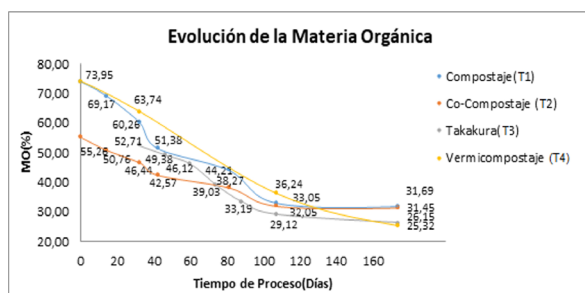


Gráfico 4. Evolución de la materia orgánica.

Los abonos orgánicos obtenidos en todos los tratamientos presentaron porcentajes superiores a los establecidos en la Directiva Europea que establece un contenido de MO superior al 15% (21).

Macronutrientes (N P K)

En la Tabla 3 se muestran los contenidos iniciales y finales de los macronutrientes de todos los tratamientos.

Macronutrientes (%)	Tratamiento	Compostaje (T1)	Co-compostaje (T2)	Takakura (T3)	Vermicompostaje (T4)
Nt	Inicial	1,43	1,28	0,85	1,69
	Final	0,81	2,33	1,04	2,34
P	Inicial	0,86	1,06	0,86	1,11
	Final	0,80	1,86	0,97	2,0
K	Inicial	2,57	2,94	1,1	2,74
	Final	0,48	4,22	1,38	3,76

Tabla 3. Macronutrientes.

Se puede observar que el compostaje (T1) es el único tratamiento en que hay una pérdida de macronutrientes. Generalmente, las pérdidas de N suelen ocurrir en el caso de tener procesos con temperaturas y pH altos lo que provoca su volatilización en forma de amoníaco (NH₃). Esto concuerda con lo observado en el compostaje. Los demás tratamientos cumplen con la normativa española que indica que los contenidos de macronutrientes deben ser superiores al 1% (29). El vermicompost presenta los valores más altos de N P K, seguido de compost obtenido por co-compostaje, el compost Takakura y el compost. Esto conlleva a que se considere el mejor tratamiento de residuos vegetales, pues los macronutrientes benefician el desarrollo de las plantas y la salud del suelo, manteniendo su textura, incrementando la capacidad de retención de agua y su riqueza microbiana lo que favorece la relación simbiótica con las plantas (32,33).

Índice de Germinación (IG)

El IG es un parámetro biológico relacionado con fitotoxicidad de los abonos orgánicos. El Gráfico 5, indica que todos los tratamientos presentan un IG > 50%, valor límite establecido por (34) para indicar la ausencia de fitotoxicidad que caracteriza un compost maduro.

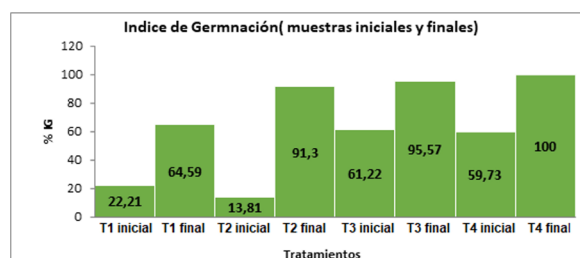


Gráfico 5. Índice de Germinación.

Los valores iniciales son más bajos, lo que posiblemente se debe a la presencia de sustancias fitotóxicas, una alta salinidad y/o presencia de microorganismos patógenos que dificultan la germinación y crecimiento de las semillas. Por esta razón, no es recomendable añadir al suelo residuos orgánicos sin un tratamiento previo.

Análisis estadístico de los principales parámetros de control

En la tabla 4 se muestra el estudio estadístico de los tratamientos efectuados en esta investigación. Se tomaron en cuenta los parámetros más representativos (macronutrientes N P K, MO e IG) que determinan la calidad de los abonos orgánicos.

Parámetro	Muestreo	Compostaje	Co-Compostaje	Vermicompostaje	Takakura	F-ANOVA
NT	Inicial	1,43ab	1,28ab	1,69 ^a	0,85b	0,020**
	Final	0,81b	2,33a	2,34 ^a	1,04b	0,00***
P	Inicial	0,89 ^a	1,06a	1,11 ^a	0,86a	0,561 ns
	Final	0,80b	1,86a	2,00a	0,97b	0,00***
K	Inicial	2,57 ^a	2,94 ^a	2,74 ^a	1,10b	0,00***
	Final	0,48b	4,22 ^a	3,76 ^a	1,37b	0,00***
MO	Inicial	73,95 ^a	63,74b	55,26c	52,71d	0,00***
	Final	31,69 ^a	31,45a	26,15b	25,32c	0,00***
IG	Inicial	25,61b	15,03b	61,52 ^a	62,91a	0,00***
	Final	65,14b	91,84b	>100 ^a	94,83b	0,00***

Nt; Nitrógeno total, P: Fósforo, K: Potasio, MO: Materia Orgánica, IG: Índice de Germinación.

*** Estadísticamente significativo $P < 0,01$, ** Significancia media, y ns: no significativo $> 0,05$, $P < 0,05$

Tabla 4. Análisis estadístico de los parámetros de control.

Según el análisis de varianza ANOVA de un factor, los análisis finales de todos los tratamientos muestran diferencias altamente significativas mostrando valores $< 0,01$. Esto corrobora que el mejor tratamiento fue el vermicompostaje gracias a la acción conjunta de los microorganismos y las lombrices que convierten y estabilizan los residuos orgánicos en un material llamado humus de lombriz, rico en nutrientes. Las lombrices ejercen una acción tanto física como bioquímica (35). La acción física incluye aireación, mezcla y molienda de los residuos orgánicos, en tanto que los microorganismos son responsables de la degradación y estabilización bioquímica (36).

IV. CONCLUSIONES

El reciclaje de los residuos orgánicos mediante tratamientos biológicos es una alternativa válida y económica para evitar que estos residuos terminen en los botaderos a cielo abierto y en el mejor de los casos, en rellenos sanitarios. En esta investigación se presentan cuatro estrategias para

la correcta gestión, tratamiento y valorización de residuos orgánicos: compostaje, co-compostaje, compostaje por el método Takakura y vermicompostaje. Todos estos tratamientos permiten obtener abonos orgánicos que reestablecen las propiedades físicas y químicas de los suelos debido a la presencia de macro y micronutrientes. De esta manera, aumentan su fertilidad y mejora la salud de los ecosistemas al disminuir el uso de fertilizantes de síntesis, propiciando un cambio hacia una agricultura sostenible y una economía circular.

Mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos, químicos y biológicos como la temperatura, humedad, pH, CE, MO, macronutrientes N P K e IG y el estudio estadístico correspondiente, se determinó que el vermicompostaje es el mejor tratamiento biotecnológico, seguido del co-compostaje, Takakura y compostaje. El vermicompostaje, es un abono de alta calidad, rico en nutrientes y en microorganismos benéficos apto para ser utilizado en prácticas agrícolas sostenibles.

V. REFERENCIAS

1. Sudharsan Varma V, Kalamdhad AS. Evolution of chemical and biological characterization during thermophilic composting of vegetable waste using rotary drum composter. *Int J of Environ Sci and Technol*. 2015 Jun 9;12(6):2015–24.
2. Jara-Samaniego J, Moral R, Pérez-Murcia MD, Paredes C, Gálvez-Sola L, Gavilanes-Terán I, et al. Urban Waste Management and Potential Agricultural Use in South American Developing Countries: A Case Study of Chimborazo Region (Ecuador). *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2015 Feb 27;46(sup1):157–69.
3. Razza F, D'Avino L, L'Abate G, Lazzeri L. The Role of Compost in Bio-waste Management and Circular Economy. In: Benetto E, Gericke K, Guiton M, editors. *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies: From Science to Innovation*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 133–43.
4. Alfa MI, Adie DB, Igboro SB, Oranusi US, Dahunsi SO, Akali DM. Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renew Energy*. 2014 Mar;63:681–6.
5. Bernal MP, Alburquerque JA, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour Technol*. 2009 Nov;100(22):5444–53.
6. Vico A, Pérez-Murcia MD, Bustamante MA, Agulló E, Marhuenda-Egea FC, Sáez JA, et al. Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *J Environ Manag*. 2018 Nov;226:408–15.
7. Rich N, Bharti A, Kumar S. Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality. *Bioresour Technol*. 2018 Mar;252:83–90.
8. Honobe Y. *El Metodo Takakura, herramienta de responsabilidad ambiental*. Quito: Publiasesores. 2013;
9. Maeda T. Reducing waste through the promotion of composting and active involvement of various

- stakeholders: Replicating Surabaya's solid waste management model. 2009;
10. Vargas, M. R. N. 2010. Vermicompostaje en el reciclado de residuos agroindustriales. In: XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, 17-19 de noviembre del 2010. Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. 43 p
 11. Moreno J, Moral R, García M, Pascual J, Bernal M. Vermicompostaje: procesos, productos y aplicaciones. Mundi-Prensa. Vol. 5. Red Española de Compostaje; 2014.
 12. Domínguez J. State-of-the-Art and New Perspectives on Vermicomposting Research. In: Earthworm Ecology. CRC Press; 2004. p. 401–24.
 13. Aira M, Monroy F, Domínguez J. Changes in bacterial numbers and microbial activity of pig slurry during gut transit of epigeic and anecic earthworms. *J Hazard Mater*. 2009 Mar;162(2–3):1404–7.
 14. Gómez-Brandón M, Aira M, Lores M, Domínguez J. Changes in microbial community structure and function during vermicomposting of pig slurry. *Bioresour Technol*. 2011 Mar;102(5):4171–8.
 15. Domínguez J, C. A. Edwards, Subler S. ACOMPARISON OF VERMICOMPOSTING AND COMPOSTING. 1997;57–9.
 16. Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*. 2008 Jul;72(7):1013–9.
 17. Hait S, Tare V. Optimizing vermistabilization of waste activated sludge using vermicompost as bulking material. *Waste Manag*. 2011 Mar;31(3):502–11.
 18. Villegas-Cornelio VM, Laines Canepa JR. Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Rev Mex De Cienc Agric*. 2017 Aug 11;8(2):393–406.
 19. García J, Villareal M, Sánchez P, Parra S, Hernández S. Fertilización con vermicomposta en maíz criollo y su tasa de descomposición en el suelo. *RIAA*. 2013;41–7.
 20. Fernández M. Aplicación de la tecnología del vermicompostaje para la valorización agronómica de residuos y detrios de cultivos de invernadero. Universidad de Granada; 2011.
 21. Reglamento (UE) 2024/1157 del Parlamento Europeo y del Consejo. Diario oficial de la Unión Europea. 2024. Disponible en. <https://www.boe.es/doue/2024/1157/L00001-00145.pdf>
 22. Kalamdhad AS, Singh YK, Ali M, Khwairakpam M, Kazmi AA. Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. *Bioresour Technol*. 2009 Dec;100(24):6442–50.
 23. Ali M, Kazmi AA, Ahmed N. Study on effects of temperature, moisture and pH in degradation and degradation kinetics of aldrin, endosulfan, lindane pesticides during full-scale continuous rotary drum composting. *Chemosphere*. 2014 May;102:68–75.
 24. Dong-Shen DS, Yang YQ, Huang HL, Hu LF, Long YY. Water state changes during the composting of kitchen waste. *Waste Manag*. 2015 Apr;38:381–7.
 25. Senthil D, Kumar P, Kumar V, Anbuganapathi G. Impact of biofertilizers on growth and reproductive performance of *Eisenia Fetida* (Savigny 1926) during flower waste vermicomposting process. *Annu Res Rev Biol*. 2013;3:574–83.
 26. Paredes C, Roig A, Bernal MP, Sánchez-Monedero MA, Cegarra J. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol Fertil Soils*. 2000 Nov 3;32(3):222–7.
 27. Moreno Casco J, Moral Herrero R. Compostaje. Mundi-Prensa Libros; 2008.
 28. González-Fernández J, Galea Z, Álvarez JM, Hormaza JI, López R. Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues. *J Environ Manag*. 2015;147:132–9.
 29. BOE. Boletín del Estado BO. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. *BOE*. 2013;164:51119–207.
 30. Bender SF, Wagg C, van der Heijden MGA. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil

- Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends Ecol Evol.* 2016 Jun;31(6):440–52.
31. Medina-Sauza RM, Álvarez-Jiménez M, Delhal A, Reverchon F, Blouin M, Guerrero-Analco JA, et al. Earthworms Building Up Soil Microbiota, a Review. *Front Environ Sci.* 2019 Jun 7;7.
 32. Sharma K, Garg VK. Solid-State Fermentation for Vermicomposting. In: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering.* Elsevier; 2018. p. 373–413.
 33. Dhiman D, Sharma R, Sankhyan NK, Sepehya S, Sharma SK, Kumar R. Effect of regular application of fertilizers, manure and lime on soil health and productivity of wheat in an acid Alfisol. *J Plant Nutr.* 2019 Nov 26;42(19):2507–21.
 34. Zucconi F, Pera A, Forte M, DeBertolli M. Evaluating Toxicity of Immature Compost. *Biocycle.* 1981;22:54–7.
 35. Garg V. K., Suthar S., Yadav, A. Management of food industry waste employing vermicomposting technology. *Bio. Technol.* 2012. 126:437-443.
 36. Aira M., Sampedro L., Monroy F., Domínguez, J. Detritivorous earthworms directly modify the structure, thus altering the functioning of a microdecomposer food web. *Soil Biol. Bio.* 2008. 40:2511-2516.