

Influencia de la incorporación de pasto estrella como material de soporte (*Cynodon Plectostachyus*) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal

Influence of using star grass (*Cynodon Plectostachyus*) as bulking agent on municipal biowaste composting

Ricardo Oviedo-Ocaña*
Martha Daza-Torres**
Luis Marmolejo-Rebellón***
Ángela Osorio-Ortiz****
Patricia Torres-Lozada*****
Universidad del Valle (Colombia)

* Ingeniero Sanitario, MSc. PhD (c). Universidad del Valle (Colombia). Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA). Facultad de Ingeniería. *edgar.oviedo@correounivalle.edu.co*

** Ingeniera Agrícola, MSc. Profesora asistente, Universidad del Valle (Colombia). Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos (IREHISA). *martha.daza@correounivalle.edu.co*

*** Ingeniero Sanitario, MAS, PhD. Profesor asistente, Universidad del Valle (Colombia). Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA). *luis.marmolejo@correounivalle.edu.co*

**** Ingeniera Sanitaria. Universidad del Valle (Colombia). Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA). *angela.osorio@correounivalle.edu.co*

*****Profesora titular, Universidad del Valle (Colombia). Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA). Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD. *patricia.torres@correounivalle.edu.co*

Correspondencia: Ricardo Oviedo Ocaña, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle, A.A 25360, Cali (Colombia).

Origen subvenciones: Proyecto de investigación de convocatoria interna de la Universidad del Valle, titulado "Metodología para mejorar la calidad del compost obtenido con biorresiduos de origen municipal acorde con las condiciones agroambientales del contexto regional". Código del proyecto: 2623. Inicio: 09/2010 - Fin: 11/2012.

Resumen

Los biorresiduos de origen municipal (BOM) se caracterizan por tener alto contenido de humedad, poca porosidad, pH ácido y bajas relaciones C/N que afectan el proceso de compostaje. Este estudio evaluó la influencia del pasto estrella (*Cynodon Plectostachyus*) como material de soporte para el compostaje. El experimento se realizó a escala de laboratorio utilizando dos tipos de sustrato: i) sustrato B (100% BOM) y ii) Sustrato E (83% BOM + 17% pasto estrella). La incorporación del pasto estrella mejoró el contenido de carbono, el pH y el soporte estructural en el sustrato E, permitiendo alcanzar la fase termofílica en menor tiempo, incrementando su duración y mejorando el valor agronómico del producto.

Palabras clave: Biorresiduos, Compostaje, Material de soporte, Pasto estrella

Abstract

Municipal Biowastes are characterized for their high moisture content, little porosity, acid pH and low C/N ratio that affect composting. This study evaluated the influence of Star Grass (*Cynodon Plectostachyus*) as bulking agent for composting. The experiment was carried out at laboratory scale using two substrates: i) B (100% Biowaste) and ii) E (83% Biowaste + 17% Star Grass). Incorporation of Star Grass improved carbon content, pH and structural support both in substrate E and its product, allowing the achievement of the thermophilic phase in less time and increasing its length. Furthermore, the agronomic value of the product also improved.

Keywords: Biowaste, Composting, Bulking Agent, Star Grass

Fecha de recepción: 28 de septiembre de 2012
Fecha de aceptación: 14 de mayo de 2013

1. INTRODUCCIÓN

El progresivo incremento en la generación de residuos sólidos municipales (RSM) es un serio problema para las comunidades urbanas. Los biorresiduos son la mayor fracción de los RSM en los países en desarrollo [1] y su transformación biológica en sitios de disposición final es precursora de la generación de lixiviados y gases de efecto invernadero causantes de impactos ambientales y sanitarios [2]. De otro lado, mientras la producción de RSM se incrementa, los suelos progresivamente pierden materia orgánica debido al cultivo intensivo y las condiciones climáticas [3]; por este motivo son cada vez más importantes las estrategias sostenibles de gestión de RSM que permitan desviar los biorresiduos de sitios de disposición final y conservar materia orgánica del suelo [4].

El compostaje es importante para este propósito, ya que puede generar un producto estabilizado de valor agrícola que permite adicionar materia orgánica a los suelos y ser fuente de nutrientes para las plantas [5], contribuyendo a disminuir el consumo de recursos no renovables asociados a la fabricación de fertilizantes sintéticos. Para alcanzar estos beneficios es necesario realizar correctamente el proceso, de manera que el producto cumpla criterios de calidad, como contenido mínimo de patógenos y metales pesados, y aporte materia orgánica estabilizada y nutrientes [6].

El proceso, la calidad del producto y los impactos ambientales del compostaje son afectados por diversas condiciones ambientales y características del sustrato [7]. De acuerdo con Agnew y Leonard [8], Chiumenti et ál. [9] y Neklyudov et ál. [10], el proceso puede desarrollarse más eficientemente con relaciones Carbono / Nitrógeno (C/N) entre 25 y 30, humedades entre 50 y 60% y valores de pH entre 6,5 y 7,5; sin embargo, diversos estudios [11] - [14] muestran que los BOM, principal materia prima de las instalaciones de compostaje de RSM en países en desarrollo, están integrados sobre todo por alimentos, los cuales se caracterizan por presentar relaciones C/N inferiores a 20, humedades superiores a 70% y pH ácido, lo que afecta el tiempo del proceso, genera ineficiencias de transformación o incide adversamente en la calidad del producto [15] - [17].

La incorporación de materiales de soporte es fundamental para mejorar las condiciones del proceso de compostaje de BOM, incrementando la porosi-

dad del material y la aireación, y propiciando condiciones más favorables de pH, humedad y relación C/N para el desarrollo de microorganismos. Haug [18] y Sundberg et ál. [16] indican, además, que para aumentar la eficiencia del proceso es recomendable que los residuos de comida sean mezclados con materiales de soporte, buscando obtener un pH mayor de 6, lo que facilita amortiguar los ácidos generados en la primera etapa del proceso y aumenta los microorganismos necesarios para el desarrollo del mismo. La selección de materiales de soporte debe considerar características como su disponibilidad, bajo costo y sus propiedades fisicoquímicas [19].

En este estudio se evaluó el pasto estrella (*Cynodon Plectostachyus*) como material de soporte para el compostaje de BOM, analizando su influencia sobre la calidad fisicoquímica de los sustratos, el comportamiento de variables del proceso (temperatura y pH) y la calidad fisicoquímica y microbiológica de los productos. Se desarrolló en la cabecera municipal Versalles, Valle del Cauca (Colombia), localidad que cuenta con una instalación de compostaje de BOM. El material fue seleccionado por su amplia disponibilidad local en la región estudiada, mínimo costo de adquisición y posibilidad de mejoramiento de las características de los sustratos, principalmente en el pH y en el soporte estructural.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio Versalles, Valle del Cauca (Colombia), con una población urbana de 3.276 habitantes, ubicado a 1.860 msnm y temperatura promedio de 18°C; este municipio se destaca porque aproximadamente 80% de la población separa los residuos en la fuente. El servicio de aseo incluye la recolección selectiva de los RSM y su traslado a una planta de manejo de residuos sólidos (PMRS) donde estos se separan y clasifican en biorresiduos, reciclables y no aprovechables, manejo similar al realizado en otras PMRS del país [20] - [21]. En promedio se generan 10,2 t sem⁻¹ de RSM, de los cuales 66% tienen potencial para ser compostados.

Caracterización de sustratos

El estudio se realizó a escala de laboratorio usando como sustratos los BOM de la cabecera municipal y una mezcla de BOM y pasto estrella en

una proporción de 83% y 17% en peso (base húmeda) respectivamente. La proporción se definió considerando reportes previos de las características de los sustratos en el área de estudio [14] y siguiendo las recomendaciones de relación C/N para el inicio del proceso [9], [18]. Los BOM a procesar se generaron por la totalidad de predios de la cabecera municipal, fueron separados en la fuente y recolectados selectivamente, y tuvieron cuatro días de almacenamiento en las viviendas (debido a la frecuencia de recolección de dos veces a la semana). Previo al inicio del experimento, se extrajeron manualmente los residuos no biodegradables, obteniéndose una cantidad total de 642 Kg. Se determinó la composición física de este sustrato y se clasificó en: i) alimentos procesados, ii) alimentos sin procesar, iii) papel y cartón, iv) residuos de poda y jardín y v) otros.

El pasto estrella fue obtenido de la poda en la PMRS del municipio y estuvo almacenado en un espacio cubierto un día antes del experimento. Ambos materiales fueron triturados manualmente con machete y los tamaños de partícula máximos alcanzados fueron de 7 cm, los cuales son recomendados para el proceso [8], [14]. Se tomaron muestras representativas de 2 kg de cada material (BOM, pasto estrella y la mezcla de BOM y pasto estrella), utilizando el método descrito por Sakurai [22], y se analizaron el pH, la humedad, las cenizas, el potasio total, el fósforo total y el carbono orgánico oxidable total (COT), siguiendo los métodos expuestos en la norma técnica colombiana (NTC) 5167 [23] y el nitrógeno total (N_{Total}), conforme lo indicado en la NTC 370 [24]. Los análisis se hicieron por duplicado y ante la ocurrencia de coeficientes de variación mayores a 10% se realizaba la repetición del análisis.

Montaje experimental y monitoreo del proceso

Se realizó compostaje aerobio por triplicado en pilas de 117 Kg con volteo manual. Las pilas conformadas solo con BOM fueron denominadas pilas B y las conformadas con BOM y pasto estrella fueron denominadas pilas E, todas con forma cónica y altura de 0,5 a 0,6 m y ubicadas en iguales condiciones ambientales en un espacio con techo impermeable, sobre una superficie nivelada, en suelo compactado y conservando una distancia mínima de tres metros entre ellas.

Las variables de control fueron la temperatura, el pH y la humedad. La temperatura fue medida diariamente en el centroide de cada pila, utilizando un termómetro de carátula de 30 cm. Para la determinación del pH y la humedad, en cada pila se tomó una muestra de 200 g, proveniente de cuatro puntos opuestos que luego eran integrados [25]. El pH se estableció utilizando el método potenciométrico, con un pHmetro WTW Modelo 315i, empleando agua destilada y material a analizar en una relación 5:1 (v/v). Para la humedad se empleó un analizador de humedad Ohaus MB-35 (Ohaus Corporation, Pine Brook, NJ). Durante las primeras cuatro semanas, estas variables (pH y humedad) fueron medidas diariamente y posteriormente una vez por semana.

La humedad se mantuvo por encima del 40% mediante la humectación con agua, tal como lo recomiendan Agnew y Leonard [8], y Dulac [26]. La cantidad de agua aplicada se determinó utilizando los valores de humedad y peso de la pila. Para garantizar la distribución uniforme del agua, se extendió el material de la pila asperjándola con una regadera y, culminada la humectación, se conformó nuevamente la pila. El volteo de las pilas también se realizó cuando se registraban temperaturas mayores o iguales a 65°C, así como para evitar la compactación de los sustratos.

El seguimiento del proceso se desarrolló hasta que la temperatura de las pilas fue cercana a la temperatura ambiente (en un rango de $\pm 5^\circ\text{C}$) y el producto tenía olor a suelo, criterios que indican la finalización de la etapa de curado [26]. Adicionalmente, se hicieron pruebas de autocalentamiento para verificar que no se dieran incrementos en la temperatura [27]. Con la información se hizo un análisis descriptivo del comportamiento de temperatura y pH, relacionándolos con la calidad de sustratos.

Calidad de los productos y análisis estadístico

Una vez concluido el período de monitoreo, se tomó una muestra representativa de cada una de las unidades experimentales, siguiendo los procedimientos expuestos en Sullivan y Miller [25]; posteriormente, se realizó la medición de las variables calcio total (CaO), magnesio total (MgO), potasio (K_2O), sodio total (Na) y Zn total (Zn) a través de electroforesis capilar (métodos estándar - SM 3112A); cadmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) y plomo (Pb) por absorción atómica (métodos estándar - SM 3111B); mercurio (Hg)

por absorción atómica vapor frío (métodos estándar - SM 3112A); arsénico (As) (métodos eEstándar - SM 3114C); cenizas, capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono orgánico oxidable total (COT), capacidad de retención de agua (CRA), densidad y humedad siguiendo lo expuesto en la norma NTC 5167; conductividad y pH por técnica potenciométrica (Soil Survey Laboratory Methods Manual Reporte N.º 42, Versión 2.0, 1992 - SSLMM 42-2-92); N_{Total} por método Kjeldahl (norma NTC 370) y fósforo total (P_2O_5) por espectrofotometría (norma NTC 243). Para los análisis microbiológicos (coliformes totales y coliformes fecales) se siguió lo estipulado en la norma NTC 5167[23].

Para evaluar la ocurrencia de diferencias significativas en los resultados de los parámetros de calidad de los productos de ambos tipos de pilas se aplicó el concepto de pruebas de aleatorización, que es una alternativa, no paramétrica a la prueba t-student cuando se requiere comparar si los promedios de dos poblaciones independientes son estadísticamente iguales o diferentes, y los supuestos en que se basa no se pueden validar debido al incumplimiento de ellos o a la poca cantidad de réplicas [28]. Para el análisis se consideró: a) si el valor - p es superior al nivel de significancia del 5%, se establece que no existen diferencias entre los tratamientos, b) en caso contrario, ambos tratamientos serán diferentes. El procesamiento estadístico se realizó en el *software* de programación para análisis de datos y gráficos de libre distribución R versión 2.12.1.

Los resultados de la calidad de los productos fueron comparados con los límites propuestos por la NTC de calidad de compost [23]. Adicionalmente, se adaptaron y aplicaron los índices de limpieza y de fertilidad propuestos por Saha et ál. [29], que permiten evaluar la calidad global del producto en función de parámetros fisicoquímicos clave.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los sustratos

La tabla 1 presenta los resultados de los análisis realizados a los sustratos al inicio del montaje experimental. En la composición física del biorresiduo (sustrato B) se observó el predominio de comida sin procesar (92,0% peso en base húmeda), integrada por elementos como frutas cítricas y no

cítricas, vegetales y carbohidratos como el plátano. Las categorías restantes corresponden en su orden a comida procesada (2,9%), poda y jardín (2,9%), otros no degradables (1,7%) y papel y cartón (0,6%).

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LOS SUSTRATOS DEL PROCESO

Parámetros	Unidad	Biorresiduos (sustrato B)	Pasto estrella	Mezcla BOM y pasto estrella (sustrato E)
pH a 27,0°C	unidades	3,99	8,04	7,13
Humedad	% (m/m)	78,07 (CV: 2,10%)	78,00 (CV: 2,40%)	79,40 (CV: 2,10%)
COT	% (m/m)	34,97 (CV: 2,20%)	36,91 (CV: 1,22%)	33,54 (CV: 0,20%)
Nitrógeno total	% (m/m)	2,28 (CV: 1,60%)	2,45 (CV: 3,92%)	2,52 (CV: 8,15%)
C/N	--	15,34	15,04	13,29
Potasio como K	% (m/m)	3,47 (CV: 7,44%)	1,18 (CV: 2,77%)	1,46 (CV: 0%)
Fósforo como P	% (m/m)	1,14 (CV: 3,96%)	1,27 (CV: 0,61%)	1,21 (CV: 0,88%)
Cenizas	% (m/m)	18,70 (CV: 2,90%)	10,91 (CV: 1,50%)	26,21 (CV: 0,40%)

Nota: Muestras en base seca; CV: Coeficiente de Variación; n: 2

Con respecto al pH, el sustrato B presentó un valor de 3,99, el cual se encuentra en el rango de valores reportado por Marmolejo [14] y Sundberg et ál. [16] en instalaciones de compostaje de BOM. Tal como lo señalan Smars et ál. [30] y Sundberg et ál. [31], la acidez del material es debida a la temprana producción de ácidos grasos y afecta el proceso de compostaje en la fase inicial de aumento de la temperatura. Sundberg y Jonsson [32] indican que el pH bajo en el proceso genera corrosión, olores, lenta descomposición y, por lo tanto, uso ineficiente de las instalaciones de compostaje baja calidad del producto y dificultades para alcanzar temperaturas adecuadas para una apropiada higienización. La incorporación de materiales de soporte para mejorar las condiciones iniciales del pH, ha sido reportada por diversos autores como un elemento favorable durante el proceso [30], [13], [33]. En este caso, la incorporación del pasto estrella (pH=8,04) favoreció el incremento en el pH del sustrato E a valores cercanos al neutro, que ayudan a mejorar la actividad microbiana y el arranque en el proceso.

En relación con la humedad, su alto contenido en los biorresiduos está asociado con la presencia de una alta proporción de residuos de comida sin procesar (residuos vegetales y de frutas), lo que reduce los espacios en la

matriz a compostar y causa limitaciones de oxígeno. El pasto estrella presentó una humedad similar a la reportada por Donnond et ál. [34] para pastos kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y estrella africana (*Cynodon dactylon*) y valores superiores a los recomendados para el proceso de compostaje (55-65%) [8] - [9]; sin embargo, sus características permiten incrementar la porosidad del medio y promover la aireación cuando se incorpora a los biorresiduos. Adicionalmente, tal como lo reportan Ahn et ál. [35], el contenido de humedad óptimo depende de la capacidad de retención de agua (CRA), mostrando procesos piloto efectivos con materiales de alta humedad y CRA entre el 60 y el 80%.

El COT de los biorresiduos fue similar a los reportados por Marmolejo et ál. [36] y Marmolejo [14] para sustratos de la zona de estudio, e inferior al indicado para ciudades de Dinamarca [37], Suecia, Finlandia y Noruega [16], y para residuos de alimentos en Canadá, Corea del Sur, Estados Unidos y Taiwán [17]. Es común complementar el COT con otros materiales ricos en este elemento (paja, aserrín y astillas de madera) [26]. En este caso, la incorporación de pasto estrella no incrementó el COT en el sustrato E.

En cuanto al N, los valores reportados para el sustrato B son mayores a los encontrados por Hanc et ál. [38] (1,57% en BOM), Dulac [26] (0,6-1,5% para RSM) y Tchobanoglous et ál. [39] (1,52% residuos de frutas), y menores a los indicados por Adhikari et ál. [17] para residuos de comida en Taiwán, Estados Unidos y Corea del Sur (2,6-4,4% para residuos de comida). La incorporación del pasto estrella no generó diferencias en el N del sustrato E, debido al valor similar de este elemento en los BOM.

La relación C/N muestra que los dos sustratos presentaron valores inferiores a los recomendados por diversas fuentes [8] - [10], [26]; la baja relación del sustrato B puede estar asociada a la presencia de alimentos vegetales, los cuales están presentes en los residuos de alimentos que integran este sustrato y que según Adhikari et ál. [17] pueden tener relaciones C/N de 12. Autores como Chan y Chen [40] reportan que el proceso puede desarrollarse a valores inferiores a 20 e incluso 15 [15], lo que puede minimizar los requerimientos de materiales complementarios. Sin embargo, tal como lo señalan Chiumenti et ál. [9], a relaciones C/N inferiores a 20, el exceso de N es liberado en forma de amoníaco, por lo que es conveniente un control apropiado en el pH y en la temperatura durante el proceso.

Debido a las características fisicoquímicas del pasto estrella (ver tabla 1), su incorporación a los BOM disminuyó el contenido de K y generó un incremento en el P. El contenido de K en los BOM puede estar asociado a la presencia de cáscaras de plátano, elemento predominante en la fracción de alimentos sin procesar, mientras que el de P se relaciona con vegetales y leguminosas. En general, la incorporación del pasto estrella a los BOM incrementó del pH de la mezcla, lo que debe favorecer el arranque del proceso y un aporte estructural que mejora la aireación y evita la formación de grumos.

Monitoreo del proceso

- *Temperatura*

La figura 1 muestra el comportamiento de la temperatura en las unidades conformadas con ambos sustratos. Este parámetro presentó valores similares en las tres pilas de cada sustrato. En ambos tipos de pilas se alcanzaron temperaturas termofílicas ($> 45^{\circ}\text{C}$) poco después de conformarse; en el caso de las pilas B, esto ocurrió después del día 4, mientras que en las pilas E, sucedió desde el día 1, ratificando el efecto favorable por la incorporación del pasto estrella. En ambos casos este rango de temperaturas se mantuvo hasta el día 20, mostrando una mayor duración de esta fase en el sustrato E y cumpliendo lo recomendado por autores como Haug [18] y Neklyudov et ál. [10], quienes indican que para efectos de la higienización, las temperaturas en el rango termofílico deben permanecer por períodos mayores o iguales a 4 días. Otros autores [41] - [42] recomiendan que para garantizar la higienización se tengan valores de 55°C al menos por dos semanas para procesos de compostaje en hileras o pilas, condición que se presentó solo en las pilas E. Durante esta fase, las pilas E alcanzaron temperaturas máximas de 65°C en dos oportunidades, mientras que las B tuvieron una temperatura máxima de 59°C .

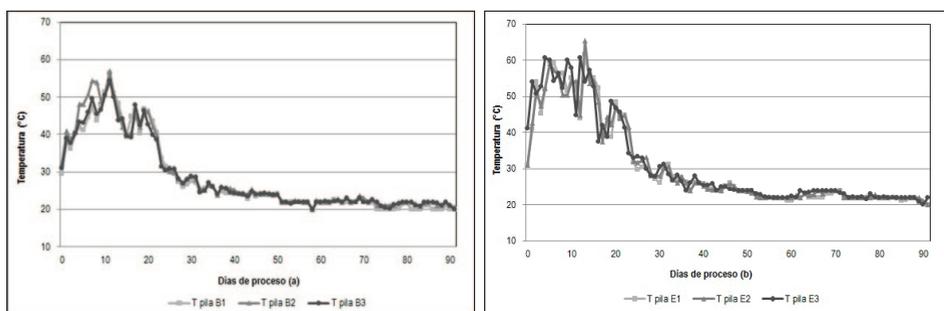


FIGURA 1. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN PILAS B Y E

El rápido incremento de la temperatura a valores termofílicos en las pilas E coincide con lo reportado por Chiumenti et ál. [9], quienes indican que entre 12 y 48 horas se pueden alcanzar estas temperaturas, las cuales aceleran el proceso, lo que se refleja en el incremento de las tasas de crecimiento microbiano y en las de reacción [43]. El menor tiempo requerido en las pilas E puede estar asociado con mejores condiciones de los sustratos (pH neutro), así como con una mejor porosidad del medio, que facilita el intercambio gaseoso con la atmósfera, generando espacio para almacenar el oxígeno requerido para el metabolismo microbiano y permitiendo la liberación de calor y de CO_2 [44]. En el caso de las pilas B se presentó un mayor grado de dificultad para los procesos de biodegradación debido a las características de los sustratos (pH bajos, alta humedad y poca porosidad).

Entre los días 20 y 50, en las pilas de ambos sustratos se presentó inicialmente un descenso pronunciado de la temperatura (hasta el día 35) y posteriormente uno más extendido (hasta el día 50), alcanzando temperaturas entre 22 y 24 °C. El descenso extendido sucede porque en esta fase la descomposición de moléculas más complejas hace más lento el proceso [44]. Desde el día 50 hasta el 91 la temperatura permanece entre 2 y 5 °C por encima de la temperatura ambiente, con valores relativamente superiores en las pilas E. Al finalizar el ensayo, las pilas de ambos sustratos tuvieron temperaturas entre 20 y 21 °C; sin embargo, estas fueron alcanzadas desde el día 73 en las pilas B y después del día 80 en las E. Esto puede estar asociado a la presencia de compuestos de difícil degradación (celulosa, hemicelulosa y lignina) en las pilas E, por la incorporación del pasto estrella, en cuya composición predominan estos elementos [45], y que promueve una descomposición más lenta.

- pH

La figura 2 presenta el comportamiento del pH en las unidades conformadas con ambos sustratos. En los dos tipos de pilas se iniciaron con valores ácidos que indican el arranque normal del proceso, por la típica formación de ácidos orgánicos [9] y que son subproductos intermedios de la descomposición microbiana de elementos fácilmente degradables (azúcares, almidones y lípidos) [46], [30].

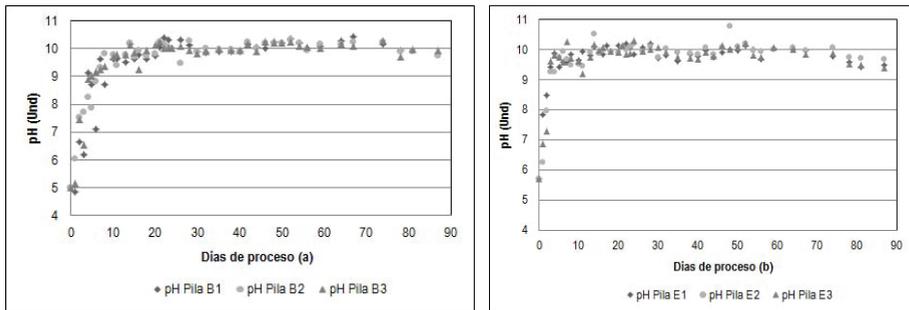


FIGURA 2. COMPORTAMIENTO DEL pH EN PILAS B Y E

El mayor pH al inicio del proceso presentado en las pilas E puede estar asociado a la influencia de la incorporación del pasto estrella, que contribuyó, además, a neutralizar los ácidos generados en la transformación de la materia orgánica. Esto puede ser efectivo para reducir la inhibición de la degradación biológica de la materia orgánica, que se presenta a un pH menor de 6,0 unidades combinado con temperaturas superiores a 40 °C [30] - [31].

En las pilas B, entre el día 3 y 6, el pH se incrementó entre 6,0 y 8,0, mientras que en las E, desde el día 2 se presentaron valores superiores a 8,0 unidades, y al día 4 alcanzaron 9,0 unidades. Beck-friis et ál. [41] indican que la descomposición de ácidos orgánicos es seguida por un rápido incremento en el pH causado por la transformación de N orgánico en N amoniacal (NH_4^+), situación que debe ser controlada, ya que el incremento en el pH, asociado con altas temperaturas, puede promover la volatilización del NH_3 [46]. Otros elementos que pudieron contribuir al incremento en el pH son la liberación de CO_2 , la aireación de la biomasa [18] y el aumento en la concentración de

bases catiónicas solubles en agua, causadas por la descomposición de la materia orgánica [47].

En ambos sustratos, el pH llegó a presentar valores mayores o iguales a 10 unidades (posterior al día 20 en el sustrato B y al 10 en el E), descendiendo a 9,8 en el sustrato B y a 9,4 en el sustrato E. Este comportamiento se debe probablemente al contenido de K, que puede estar presente por la alta presencia de cáscaras de plátano en ambos sustratos. De acuerdo con Kalemelawa et ál. [47], el ion K^+ disponible en forma soluble en agua, combinado con ácidos bicarbonatos (HCO_3^-) producidos durante la mineralización de la materia orgánica, pueden formar una base fuerte como el KOH.

Calidad del producto

La tabla 2 presenta los resultados de calidad de los productos de las pilas de ambos sustratos. Se presentan diferencias significativas ($P < 0,05$) en pH, COT, P, cenizas, conductividad, CRA y densidad.

TABLA 2. CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FINALES EN LAS PILAS DE AMBOS SUSTRATOS

Parámetro	Unidades	Productos B		Productos E		P<0,05
		Promedio	S	Promedio	S	
Humedad	%	24,37	5,9	27,50	3,6	0,411
pH	Unidades	9,86	0,1	8,85	0,1	0
COT	%	10,13	1,3	13,53	0,8	0
N _{Total}	%	1,05	0,2	1,18	0,2	0,378
Relación C/N	--	10,10	3,6	11,83	3,3	0,399
K _{Total}	%	1,76	1,3	1,66	0,5	0,902
P _{Total}	%	0,91	0,1	0,42	0,0	0
Conductividad eléctrica	dS/m	0,23	0,0	0,30	0,0	0
CIC	meq/100g	29,33	4,7	32,00	1,0	0,288
CRA	%	93,37	12,2	119,13	14,2	0
Densidad	g/cm ³	0,60	0,0	0,48	0,0	0
IF ¹	Unidades	3,67	0,2	3,77	0,4	--

Nota: ¹IF: Índice de fertilidad. Escala de valoración del índice de 1 a 5, donde 5 es el mejor [29]; S: desviación estándar

Respecto de la humedad, ambos productos alcanzaron valores que cumplen con lo establecido en la norma técnica colombiana (NTC 5167). De acuerdo con Saha et ál. [29], la humedad deseable en el producto es de 15 a 25%, no obstante, Herity [27] indica que a valores inferiores a 35% puede estar muy seco y dificulta su manejo durante la aplicación.

El valor del pH en el producto puede tener un efecto en el suelo posterior a su aplicación e influenciar la disponibilidad de nutrientes para las plantas; el rango recomendado está en función del tipo de suelo y uso del producto [48]. En este estudio, la incorporación del pasto estrella tuvo un efecto positivo en el pH del producto, incidiendo en la obtención de menores valores en el producto E y en el cumplimiento de lo establecido en la norma colombiana ($\text{pH} < 9$). El alto pH en B ha sido reportado como un elemento crítico en las PMRS en la zona de estudio. A pesar de la reducción del pH en E, ambos tipos de productos tendrían restricciones para su aplicación en suelos básicos como los salinos, sódicos y salino-sódicos. Su aplicación resultaría favorable en suelos ácidos, en los cuales generalmente la disponibilidad de bases intercambiables como Ca, Mg y K es baja, por lo que estos productos contribuirían tanto a subir el pH del suelo como a suministrar nutrientes que pueden complementar la fertilización convencional [49].

En ambos tipos de producto, el contenido de COT no cumplió lo estipulado en la NTC ($>15\%$), sin embargo, la incorporación de pasto estrella favoreció un mayor contenido de COT en el producto E. En el caso de productos provenientes únicamente de biorresiduos separados en la fuente (pilas B), el límite de la norma es difícilmente alcanzable y varios autores recomiendan la revisión y ajuste de las normas en lo que respecta a este parámetro [14], [29]. De otro lado, las condiciones presentadas para el producto E, tales como mayor contenido de COT asociado con una relativa mayor CIC, una disminución de la densidad aparente y un aumento en la CRA (ver tabla 2), puede traer beneficios importantes al suelo, como una mayor retención de nutrientes y agua, el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo y el incremento de la actividad microbiana.

Con respecto al N_{Total} , aunque en ambos productos se cumple lo planteado en la NTC ($> 1\%$), el del sustrato E presenta un valor medio superior al del producto B, lo cual está asociado tanto a un mayor contenido de N en el sustrato E como a un mejor control del pH y la temperatura presentado

durante el proceso, que minimiza las posibles pérdidas por volatilización. En cuanto al potencial fertilizante de los productos, los valores alcanzados no permiten reemplazar la fertilización inorgánica cuando el producto es empleado en agricultura comercial. De acuerdo con diversos autores [50], [51], [25], la relación C/N de un compost debe estar en el rango de 10 a 15, situación presentada para ambos tipos de producto, aunque con mayores restricciones para el caso de las pilas B. La baja relación C/N en ambos tipos de productos está relacionada con el bajo contenido de C en los sustratos, a pesar de observarse la contribución de la incorporación del pasto estrella para mejorarla.

El P también es un importante nutriente para las plantas y se encuentra generalmente entre 0,4 y 1,1% para compost proveniente de BOM [27]. En este estudio, ambos productos están en el rango indicado, con un contenido mayor en el producto B; sin embargo, ninguno cumple con el valor mínimo de reporte estipulado en la NTC (1% para enmiendas), lo que amerita identificar alternativas para complementar el sustrato. Desde el punto de vista agronómico, el contenido de P es bajo para la producción de cultivos y en suelos derivados de cenizas volcánicas, como los que predominan en la localidad de estudio, es mayor la limitación, pues se tiende a fijar el P y no dejarlo disponible para las plantas, ratificando la necesidad de complementar la fertilización en cultivos donde se esperan altos rendimientos.

En relación con el K, ambos tipos de productos tienen contenidos superiores a los reportados por Herity [27] y Marmolejo [14] para productos provenientes de la transformación de BOM, y cumplen con lo estipulado por la NTC. El mayor contenido de K en B está asociado a la mayor presencia de este en el sustrato.

La conductividad eléctrica es una medida indirecta del contenido de sales, que a su vez se asocia a la presencia de sodio, cloruro, potasio, nitrato, sulfato y sales de amonio, las cuales en elevadas concentraciones son tóxicas para las plantas e inhiben su crecimiento [52], [25]. Los resultados muestran que hay diferencias significativas entre los productos de los dos tratamientos y se presentan mayores valores en E, aunque en todos los casos se encuentra en los rangos recomendados por Dinambro et ál. [48] (< 2 dS/m) o por Benito et ál. [53] ($< 0,5$ dS/m).

La aplicación del índice de fertilidad muestra que sobre una escala de 1 a 5, los productos de B tienen un valor de 3,67 y los productos de E, 3,77, lo que implica que haya una mejor calidad agronómica en estos últimos. Las principales limitaciones desde el punto de vista agronómico están relacionadas con la baja presencia de COT, así como con la relación C/N.

- Metales pesados

La tabla 3 presenta los resultados de metales pesados en los productos de ambos sustratos.

**TABLA 3. METALES PESADOS EN LOS PRODUCTOS FINALES
 EN LAS PILAS DE AMBOS SUSTRATOS**

Parámetro	Unid.	UE ¹	EEUU	NTC 5167	Productos B		Productos E		P<0,05
					Promedio	S	Promedio	S	
As	ppm	10	NA	54	16,43	17,6	5,08	2,8	0,303
Cd	ppm	0,7 – 1,5	20	18	<0,003		<0,003		--
Cr	ppm	100 – 150	1500	1200	<0,02		<0,02		--
Hg	ppm	0,5 - 1	NA	5	0,14	0,0	0,16	0,1	0,492
Ni	ppm	50 - 75	210	180	24,46	2,5	26,19	1,6	--
Pb	ppm	100 - 300	150	300	<0,01		<0,01		--
Zn	ppm	150-300	600	NA	47,60	53,6	11,00	1,4	0
ÍL ²	--	--	--	--	4,93	0,1	4,93	0,1	--

Nota: 1Rango mínimo y máximo de metales pesados para compost clase I y II, respectivamente; S: desviación estándar.

2IL: índice de limpieza. Escala de valoración del índice de 1 a 5, donde 5 es el mejor [29].

En este experimento, los contenidos de Cd, Cr, Ni y Pb fueron iguales o inferiores al límite de detección de las pruebas; en el caso del As y Hg no se presentaron diferencias significativas entre los productos B y E, caso contrario con lo presentado por el Zn. En todos los casos, el contenido de los metales indicados en la tabla 3 cumple con los límites propuestos por las normas colombiana, estadounidense y de la Comunidad Económica Europea (compost tipo I y II). Estos resultados muestran que la contaminación por metales pesados no es un elemento que restrinja el uso agronómico del producto y que su baja presencia está relacionada con la calidad de los

sustratos, los cuales provienen de materiales separados en la fuente. Esto se corrobora con el índice de limpieza efectuado a todos los productos, los cuales sobre una escala de 1 a 5 presentaron valores entre 4,9 y 5,0 unidades.

- Análisis microbiológicos

En relación con los coliformes totales y fecales, las pilas B presentaron valores promedio de 21 NMP/100g (S=3) y 11 NMP/100g (S=2) respectivamente, mientras las E fueron de 26 NMP/100g (S=3) y 20NMP/100g (S=5). En ninguno de los dos parámetros hubo diferencias significativas (valores de P de 0,905 y de 0,385 para coliformes totales y fecales, respectivamente). A pesar de que la norma colombiana no estipula límites para los coliformes fecales, los resultados muestran un bajo contenido de los mismos, que cumple con los mínimos indicados en normas como la de Estados Unidos y México. La baja presencia de coliformes fecales indica efectividad en los procesos de higienización del material, lo cual está asociado al mantenimiento de las condiciones termofílicas por periodos de tiempo superiores a 15 días en todas las unidades experimentales. La no eliminación total puede atribuirse a procesos de contaminación inherentes a la experimentación en condiciones reales. En este experimento no se presentó influencia significativa por la incorporación del pasto estrella en la presencia de coliformes.

4. CONCLUSIONES

Los BOM se caracterizan por presentar una alta proporción de residuos de alimentos, pH ácido y elevada humedad que afectan el inicio del proceso de compostaje, por lo que la incorporación de materiales de soporte como el pasto estrella no solo contribuye a mejorar el pH inicial del material sino a proporcionar material estructural que facilita la aireación de las pilas, generando un ambiente favorable para el desarrollo del proceso.

La incorporación del pasto estrella demostró ser efectiva para alcanzar la fase termofílica en menores tiempos y mantenerla con una mayor duración, lo que garantiza condiciones adecuadas para la higienización del producto. Así mismo, mejoró las condiciones iniciales del pH, lo cual puede ser fundamental para evitar la volatilización del nitrógeno durante las primeras fases del proceso. La calidad del producto se vio favorecida por una disminución en el pH, un mayor aporte de carbono, nitrógeno y relación C/N,

elementos que incrementan el valor agronómico del producto y muestran la contribución del pasto estrella no solo como material de soporte sino también de enmienda. En cuanto al contenido de metales pesados y los parámetros microbiológicos analizados en los productos, no presentaron diferencias significativas con la adición del pasto estrella en el proceso.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle por la financiación del proyecto de investigación en el marco del cual se efectuó el estudio; a la Cooperativa de Servicios Públicos de Versalles, Camino Verde APC, por el apoyo para el desarrollo del experimento; al estadístico Wilmar A. Torres por el procesamiento estadístico desarrollado y a Colciencias por la beca para los estudios doctorales de R. Oviedo.

REFERENCIAS

- [1] A. Troschinetz and J. Mihelcic, "Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries," *Waste Manage.*, vol. 29, pp. 915-923, 2009.
- [2] USEPA, "Biosolids technology fact sheet," Environmental Protection Agency, Washington, D.C. Rep. EPA 832-F-00-061, 2000.
- [3] L.F. Díaz, et ál., "The management of solid waste in economically developing countries-mayor needs," in *Eleventh International Waste Management and Landfill Symp.*, S. Margherita di Pula, Sardinia, Italy, 2007.
- [4] C. Tognetti, et ál., "Comprehensive quality assessment of municipal organic waste composts produced by different preparation methods," *Waste Manage.*, vol. 31, pp. 1146-1152, 2011.
- [5] M. Odlare, et ál., "Land application of organic waste-Effects on the soil ecosystem," *Appl. Energy*, vol. 88, pp. 2210-2218, 2011.
- [6] C. Tognetti, et ál., "Co-composting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality," *BiolFertil Soils*, vol. 43, pp. 387-397, 2007.
- [7] A. De Guardia, et ál., "Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, nitrogen dynamic," *Waste Manage.*, vol. 30, pp. 415-425, 2010.
- [8] J.M. Agnew and J.J. Leonard, "The physical properties of compost," *Compost Science and Utilization*, vol. 11, pp. 238-264, 2003.
- [9] A. Chiumenti, et ál., *Modern Composting Technologies*. Emmaus, PA: JG Press, 2005.
- [10] A.D. Neklyudov, et ál., "Intensification of composting processes by aerobic microorganisms: A review," *Biochemistry and Microbiology*, vol. 44, pp. 6-18, 2008.

- [11] J. Chang and T. Hsu, "Effects of compositions on food waste composting," *Bioresource Technol.*, vol. 99, pp. 8068-8074, 2008.
- [12] B. Adhikari, et ál., "Effectiveness of three bulking agents for food waste composting," *Waste Manage.*, vol. 29, pp. 197-203, 2009.
- [13] H. Yu and G. Huang, "Effect of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste," *Bioresource Technol.*, vol. 100, pp. 2005-2011, 2009.
- [14] L.F. Marmolejo, "Marco conceptual para la sostenibilidad de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales menores a 20.000 habitantes del Valle del Cauca," Ph.D. Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2011.
- [15] M. Kumar, et ál., "Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio," *Waste Manage.*, vol. 30, pp. 602-609, 2010.
- [16] C. Sundberg, et ál., "Characterisation of source-separated household waste intended for composting," *Bioresource Technol.*, vol. 102, pp. 2859-2867, 2011.
- [17] B. Adhikari, et ál., "Characterization of food waste and bulking agents for composting," *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 795-804, 2008.
- [18] R.T. Haug, *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1993.
- [19] M.K. Iqbal, et ál., "Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost," *Bioresource Technol.*, vol. 101, pp. 1913-1919, 2010.
- [20] SSPD. (2008). *Diagnóstico sectorial. Plantas de aprovechamiento de residuos sólidos* [Online]. Available: http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=73cfd722-c46e-4caf-b03f486810f6536c&groupId=10122
- [21] E.R. Oviedo, et ál., "Intervenciones priorizadas en plantas de manejo de residuos sólidos mediante la aplicación del análisis estructural," *Revista Ingeniería y Universidad*, vol. 15, pp. 125-144, 2011.
- [22] K. Sakurai. (2000). *Método Sencillo del Análisis de Residuos Sólidos - HDT 17* [Online]. Available: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repdisc/publica/hdt/hdt017.html>
- [23] *Productos para la Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo*, Norma Técnica Colombiana 5167, 2003.
- [24] *Abonos o Fertilizantes. Determinación de Nitrógeno Total*, Norma Técnica Colombiana 370, 1997.
- [25] D.M. Sullivan and R.O. Miller, "Compost quality attributes, measurements, and variability," in: *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*, P.J. Stoffella and B.A. Kahn, Eds. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 2001, pp. 95-120.
- [26] N. Dulac, *The Organic Waste flow in Integrated Sustainable Waste Management*. Netherlands: WASTE, 2001.

- [27] L. Herity, "A Study of the Quality of Waste derived Compost in Ireland," M.S.Thesis, Faculty of Engineering, Queens University of Belfast, Northern Ireland, UK, 2003.
- [28] E.S. Edgington, *Randomization Tests*. New York, USA: Marcel Dekker Inc, 1995.
- [29] J.K. Saha, et ál., "An assessment of municipal solid waste compost quality produced in different cities of India in the perspective of developing quality control indices," *Waste Manage.*, vol. 30, pp. 192-201, 2010.
- [30] S. Smars, et ál., "Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control," *Biore-source Technol.*, vol. 84, pp. 237-241, 2002.
- [31] C. Sundberg, et ál., "Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting," *Bioresource Technol.*, vol. 95, pp. 145-150, 2004.
- [32] C. Sundberg and H. Jonsson, "Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration," *Waste Manage.*, vol. 28, pp. 518-526, 2008.
- [33] M. López, et ál., "Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, pp. 222-228, 2010.
- [34] H. Donnond, et ál., "Efecto de cuatro niveles de cáscara de banano maduro sobre la degradabilidad ruminal de la materia seca de los pastos kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y estrella africana (*Cynodon Nlemfluensis*) en Vacas Jersey," *Agronomía Costarricense*, vol. 22, pp. 163-172, 1998.
- [35] H. K. Ahn, et ál., "Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials," *Waste Management*, vol. 28, pp. 1411-1416, 2008.
- [36] L.F. Marmolejo, et ál., "Influencia de la separación en la fuente sobre el compostaje de residuos sólidos municipales," *Revista Agronómica de la Universidad Nacional*, vol. 28, pp. 319-328, 2010.
- [37] T.L. Hansen, et ál., "Composition of source-sorted municipal organic waste collected in Danish cities," *Waste Manage.*, vol. 27, pp. 510-518, 2007.
- [38] A. Hanc, et ál., "Composition and parameters of household bio-waste in four seasons," *Waste Manage.*, vol. 31, pp. 1450-1460, 2011.
- [39] G. Tchobanoglous, et ál., *Gestión Integral de Residuos*. Madrid: McGraw-Hill / Interamericana, 1994.
- [40] J.I. Chang and Y.J. Chen, "Effects of bulking agents on food waste composting," *Biore-source Technol.*, vol. 101, pp. 5917-5924, 2010.
- [41] B. Beck-Friis, et ál., "Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under di-

- fferent temperature regimes," *J. of Agricultural Eng. Res.*, vol. 78, pp. 423-430, 2001.
- [42] R. Böhm, "Pathogenic Agents," in: *Compost Science and Technology*, L.F. Diaz, et ál., Eds. *Waste Management Series 8*, 2007.
- [43] J.I. Chang, et ál., "Thermophilic composting of food waste," *Bioresource Technol.*, vol. 97, pp. 116-122, 2006.
- [44] S. Gajalakshmi and S.A. Abbasi, "Solid Waste Management by Composting: State of the Art," *Critical Reviews in Environmental Sci. and Technol.*, vol. 38, pp. 311-400, 2008.
- [45] M.A. Laredo y A. Cuesta, *Tabla de Contenido Nutricional en Pastos y Forrajes de Colombia*, 2da ed., Bogotá: ICA, 1988.
- [46] M. De Bertoldi, et ál., "The biology of composting: A review," *Waste Manage and Research*, vol. 1, pp. 157-176, 1983.
- [47] F. Kalemelawa, et ál. (2012, April). An Evaluation of Aerobic and Anaerobic Composting of Banana Peels Treated with Different Inoculums for Soil Nutrient Replenishment. *Bioresource Technol.* Available DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.030>
- [48] M.E. Dimambro, et ál. (2006). *Biodegradable Municipal Waste Composts: Analysis and Application to Agriculture*. Available: www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/nitrogenandenvironment/summary/dimambro2006.pdf
- [49] R. Zapata, *La Química de la Acidez del Suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [50] R. Barberis and P.Nappi, "Evaluation of compost stability," in: *The Science of Composting*, M. de Bertoldi, et ál., Eds. England: Blackie Academic and Professional, 1996, pp. 175-184.
- [51] R. Barrena, et ál., "El uso de índices respirométricos en el proceso de compostaje: revisión del estado actual de la metodología," *Residuos*, vol. 93, pp. 46-58, 2006.
- [52] J. Hargreaves, et ál., "A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture," *Agriculture Ecosystems and Environment*, vol. 123, pp. 1-14p, 2008.
- [53] M. Benito, et ál., "Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability," *Bioresource Technol.*, vol. 97, pp. 2071-2076, 2006.