

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE Y LOMBRICOMPOSTAJE
DE LA MEZCLA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR, ESTIÉRCOL DE
GANADO BOVINO Y RESIDUOS DE ALIMENTOS PROCESADOS**

**ANNA MARÍA BLANCO BARRERA
ERICK RENÉ RUIZ ÁLVAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE Y LOMBRICOMPOSTAJE
DE LA MEZCLA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR, ESTIÉRCOL DE
GANADO BOVINO Y RESIDUOS DE ALIMENTOS PROCESADOS**

ANNA MARÍA BLANCO BARRERA

ERICK RENÉ RUIZ ÁLVAREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Químico**

Director

Prof. EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA

Ph.D en Ing. Sanitaria y ambiental

Co-Directora

Prof. VIVIANA SÁNCHEZ TORRES

Ph.D en Ing. Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2019

A Dios por bendecirme todos los días, por poner en mi camino risas, por iluminar mi vida y porque tengo a los que más quiero junto a mí.

A mis padres, Martica y Josefín, como les digo de cariño, quienes con su amor y comprensión siempre me han sabido guiar por el camino de la vida, ellos son mi motor y mi mayor inspiración. Mil gracias porque sin su apoyo no hubiera podido alcanzar un peldaño más en esta travesía, esto es por y para ustedes.

A las chimos, las consentidas de la casa, mis queridas hermanas, a Pao, Sofi y Maybrith(mijitus) las que me alegran la vida con sus locuras y consejos, las que siempre están ahí, sacándome una sonrisa, motivándome y apoyándome aún en los momentos no tan buenos. Mi respeto y gran admiración, lo estamos logrando señoritas.

A mis amigas; Linis, Zuliqueña, Dayis y Sandris, de quienes aprendí y sigo aprendiendo cada día, ellas con su personalidad, sus locuras, cariño y gran empatía logran sacarme una sonrisa. Mil gracias por su apoyo incondicional y déjenme decirles que las trasnochadas, los días que pasamos en vela y todos los sacrificios valieron la pena.

Y no podía dejar de nombrar a mi compañero de tesis, Ericksillo, el más comprensivo y paciente de todos; nos reímos, lloramos, peleamos, pero lo logramos.

Anna María Blanco Barrera

A Dios por ser mi guía y protector de mi familia.

A mis padres, Henry y Adela, por su apoyo incondicional en cada momento difícil en este camino que decidí emprender, por sus enseñanzas, consejos y cátedras de paciencia y fe que no podían faltar. Esto es por y para ustedes.

A mi sobrina Estefania por sacarme la piedra para mantenerme entretenido, y por el cariño y afecto que le tengo producto de su bendita terquedad. Siempre estaré dispuesto a sacrificar lo que sea necesario por verla satisfecha.

A mis hermanos Isabel y Elkin por caminar conmigo de la mano, por sus consejos y relajos que nos caracterizan. A Edwin, mi hermano de otra madre, que ha hecho parte de nuestra familia y me ha enseñado el valor de la amistad.

En general, a toda mi familia, abuelita, tía Yola, tíos, tías y primos quienes han hecho parte importante de este camino y aportaron su granito de arena.

A mis amigos Holman, Richar, Mario, Yonatan, Edwin, Jairo, Paulita, David, John, Wil y Ronald por estos años de hermandad como un equipo y por poner su chispa de alegría a cada locura que hicimos. “Weeeeeyyyyy”.

A mi compañera de tesis Annita por su responsabilidad y entrega en este proyecto y por ser una persona humilde y correcta en todo sentido.

A todos mil y mil gracias. ¡LO LOGRAMOS!

Erick René Ruiz Álvarez

AGRADACIMIENTOS

A la **Universidad Industrial de Santander**, nuestra *alma máter*, por contribuir en nuestra formación integral.

A nuestros directores **Edgar Ricardo Oviedo Ocaña** y **Viviana Sánchez Torres** y a la Ingeniera **Angélica María Hernández Gómez**, por su entrega, dedicación y compromiso en el desarrollo de este proyecto.

Al **Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH)**, por el apoyo brindado durante la fase experimental de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1 PROCESO DE COMPOSTAJE	20
1.2 PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE	21
1.3 PROCESO DE COMPOSTAJE-LOMBRICOMPOSTAJE EN SERIE.....	22
1.4 PARÁMETROS DEL PROCESO	23
2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	25
2.1 MATERIAS PRIMAS	26
2.1.1 Determinación de la mezcla de los materiales y acondicionamiento del lugar.....	26
2.2 CARACTERIZACIÓN Y MONTAJE.....	27
2.3 MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO	28
2.4 GERMINACIÓN, ESTABILIDAD Y CALIDAD DEL PRODUCTO	30
2.4.1 Prueba de germinación	30
2.4.2 Prueba de estabilidad.....	31
2.4.3 Tamizaje y análisis de calidad del producto	32
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	33
3.2 MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO	34
3.2.1 Temperatura.....	34
3.2.2 Humedad.....	36

3.2.3	pH.....	37
3.2.4	Conductividad eléctrica (CE)	38
3.2.5	Concentración de oxígeno.....	39
3.2.6	Peso volumétrico	40
3.3	MADUREZ, ESTABILIDAD Y CALIDAD DEL PRODUCTO FINAL	41
3.3.1	Prueba de germinación	41
3.3.2	Prueba de estabilidad.....	42
3.3.3	Análisis de calidad del producto	43
4.	CONCLUSIONES.....	46
5.	RECOMENDACIONES	47
	BIBLIOGRAFÍA.....	48
	ANEXOS.....	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de parámetros fisicoquímicos del compostaje y lombricompostaje.....	23
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de la muestra inicial	33
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos finales.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama metodológico.....	25
Figura 2. (a) Pila C, (b) Cama L, (c) Pila C-L.....	28
Figura 3. Comportamiento de la temperatura para C, L y C-L.....	35
Figura 4. Comportamiento de la humedad para los tratamientos C, L y C-L.....	37
Figura 5. Comportamiento del pH para los tratamientos C, L y C-L.....	38
Figura 6. Comportamiento de la conductividad eléctrica para C, L y C-L.....	39
Figura 7. Porcentaje de índice de germinación para los tratamientos C, L y C-L.	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Revisión literaria de compostaje y lombricompostaje de distintos tipos de residuos orgánicos.....	59
Anexo B. Cálculo de la relación C/N.....	61
Anexo C. Incrementos de autocalentamiento de Dewar, clasificación y descripción de la estabilidad basada en el sistema europeo.	62
Anexo D. Comportamiento del peso volumétrico para el tratamiento C.....	63
Anexo E. Resultados de la prueba de estabilidad realizadas a los tratamientos C, L y C-L con el equipo RM 82.....	64

NOMENCLATURA

Índices

<i>BC</i>	<i>Bagazo de caña de azúcar</i>
<i>C</i>	<i>Compostaje</i>
<i>CE</i>	<i>Conductividad eléctrica</i>
<i>C-L</i>	<i>Compostaje-lombricompostaje</i>
<i>C/N</i>	<i>Relación carbono-nitrógeno</i>
<i>COT</i>	<i>Carbono orgánico oxidable total</i>
<i>EB</i>	<i>Estiércol bovino</i>
<i>IG</i>	<i>Índice de germinación</i>
<i>K</i>	<i>Potasio total</i>
<i>L</i>	<i>Lombricompostaje</i>
<i>N</i>	<i>Nitrógeno total</i>
<i>P</i>	<i>Fósforo total</i>
<i>p/p</i>	<i>Porcentaje peso a peso</i>
<i>RAP</i>	<i>Residuos de alimentos procesados</i>

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE Y LOMBRICOMPOSTAJE DE LA MEZCLA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR, ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO Y RESIDUOS DE ALIMENTOS PROCESADOS*

AUTORES: Anna María Blanco Barrera – Erick René Ruiz Álvarez**

PALABRAS CLAVE: Compostaje, Lombricompostaje, Bagazo, Estiércol bovino, Residuos de alimentos procesados.

DESCRIPCIÓN

El sector agropecuario genera grandes cantidades de biomasa residual, estos residuos al no ser dispuestos de forma adecuada pueden generar problemas de contaminación ambiental. La industria azucarera es una de las principales productoras de estos residuos, tal es el caso del bagazo de caña de azúcar (BC), el cual presenta problemas para su degradación debido a la presencia de compuestos lignocelulósicos. El compostaje (C), lombricompostaje (L) y compostaje-lombricompostaje (C-L), son métodos adecuados para el tratamiento y gestión de estos residuos. En este estudio, la mezcla de bagazo de caña de azúcar (BC), estiércol bovino (EB) y residuos de alimentos procesados (RAP), se realizó con el fin de evaluar las condiciones del proceso como temperatura, contenido de humedad, conductividad eléctrica (CE), pH, índice de germinación (IG) y estabilidad de la mezcla de sustratos propuesta, además de analizar las características fisicoquímicas de los productos obtenidos. El experimento se realizó a escala piloto utilizando un diseño de mezcla de 35,64% RAP, 32,45% EB y 31,91% BC (p/p) para los tratamientos C, L y C-L. Los tres tratamientos alcanzaron la temperatura ambiente al final del proceso, pH cercanos al neutro, bajas relaciones C/N y grado de estabilidad V. Se observó una mejor calidad del producto en el tratamiento L, presentando mayores concentraciones de fósforo total (P), potasio total (K) y valores de conductividad eléctrica (CE) más bajos comparado con los tratamientos C y C-L. El índice de germinación (IG) del producto final para el tratamiento L fue de 148%, lo que indica que el producto puede ser adecuado para uso agrícola.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE COMPOSTING AND VERMICOMPOSTING PROCESS OF SUGAR CANE BAGASSE, CATTLE MANURE AND PROCESSED FOOD WASTE MIXTURE*

AUTHORS: Anna María Blanco Barrera – Erick René Ruiz Álvarez**

KEYWORDS: Composting, Vermicomposting, Bagasse, Cattle manure, Processed food waste.

DESCRIPTION

The agricultural sector generates large quantities of residual biomass, since these wastes are not disposed of properly they can generate great problems of environmental contamination. The sugar industry is one of the main producers of this waste, this is the case of sugarcane bagasse (BC), which presents problems for its degradation due to the presence of lignocellulosic compounds. Composting (C), vermicomposting (L) and composting-vermicomposting (C-L) are suitable methods for the treatment and management of this waste. In this study, the mixture of sugarcane bagasse (BC), cattle manure (EB) and processed food waste (RAP), was conducted in order to evaluate the conditions such as temperature, moisture content, electrical conductivity (CE), pH, germination index (IG) and stability of the proposed substrate mixing process, in addition, analyze the physicochemical characteristics of the products obtained. The experiment was conducted on a pilot scale using a mix design of 35,64% RAP, 32,45% EB and 31,91% BC (p/p) for treatments C, L and C-L. The three treatments reached the ambient temperature at the end of the process, pH near the neutral, low C / N ratios and degree of stability V. A better quality of the product was observed in the L treatment, presenting higher concentrations of total phosphorus (P), total potassium (K) and lower electrical conductivity (CE) values compared with treatments C and C-L. The germination index (GI) of the final product for treatment L was 148%, which indicates that the product may be suitable for agricultural use.

* Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Advisor: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Civil Engineer, M.Sc., Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Colombia, por su posición geográfica y variedad de climas, ofrece condiciones favorables para el desarrollo de las actividades agropecuarias. El país cuenta con una superficie continental de 114'174.800 hectáreas, de las cuales el 44,77% se estima que se destina a la actividad agropecuaria¹. Para el año 2011, en Colombia se generaban más de 177 millones de toneladas al año de biomasa residual provenientes del sector agropecuario, derivados de una gran variedad de fuentes del sector agrícola (residuos de cosecha y agroindustriales), del sector pecuario (estiércol bovino, porcino y avícola) y del sector de residuos sólidos orgánicos urbanos (residuos de plazas de mercado, de centros de abastos y residuos de poda)², estos ocasionan considerables impactos sobre el medio ambiente si no son sometidos a un tratamiento adecuado³.

Con respecto a la caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*), la industria azucarera es una de las más representativas en Colombia con 15 ingenios ubicados en el departamento del Valle del Cauca, estos producen cerca de 169.371 t/ha de caña de azúcar⁴. Durante el proceso de producción se genera aproximadamente por cada tonelada de tallos de caña de azúcar 250 kg de bagazo, 30 kg de cachaza, 6 kg de cenizas, 45 kg de melaza⁵. El bagazo es un residuo fibroso constituido por celulosa (50%), hemicelulosa (25%) y lignina (25%)⁶, empleado como combustible en los ingenios paneleros y azucareros; la quema de este residuo produce una gran contaminación por las partículas sólidas emitidas⁷. Para el tratamiento de estos

¹ Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporación Colombia Internacional – CCI (2006). Oferta Agropecuaria ENA 2006.

² ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto, *et al.* Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. ISBN:978-958-8504-59-9.

³ RUANO USCATEGUI, Diana & TREJO CASTRO, Álvaro. Evaluación de abono orgánico de residuos agropecuarios en cultivos de *Pisum sativum* y *Solanum phureja*. Revista Agronomía, 2014, vol. 22, no.1., pp. 44-57. ISSN 0568-3076.

⁴ LONDOÑO CAPURRO, Luis Fernando. Aspectos generales del sector azucarero colombiano. 2015-2016. ASOCAÑA (Sector azucarero colombiano).

⁵ CURY R., Katia, *et al.* Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. Revista Colombiana de Ciencia Animal, 2017, vol. 9, pp. 122-132.

⁶ PANDEY, Ashok, *et al.* Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. Bioresource Technology, 2004, vol. 74, no. 1, pp. 1-10.

⁷ GIL UNDAY, Zuleiqui. Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio de caso "Melanio Hernández". Universidad de Girona. Tesis doctoral, 2005.

residuos, se han estado empleando tecnologías como: el compostaje, lombricompostaje, compostaje-lombricompostaje y la digestión anaerobia.

El compostaje es una descomposición biológica de desechos orgánicos principalmente bajo condiciones aeróbicas⁸, el cual presenta cuatro etapas (mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración) que influyen en el proceso de transformación de la biomasa residual por la acción de microorganismos aerobios⁹. Del mismo modo, el lombricompostaje es un proceso de descomposición biológica de los desechos orgánicos, pero con la adición de lombrices, lo que ayuda al proceso de estabilización de desechos¹⁰; este no presenta etapa termofílica e implica interacciones entre lombrices y microorganismos para biodegradar desechos orgánicos generalmente a un ritmo más rápido¹¹. Sin embargo, cada uno de estos procesos tiene sus desventajas; el compostaje, requiere aireación frecuente para mantener las condiciones aeróbicas¹², mientras que el lombricompostaje, requiere temperaturas entre 20-25 °C, debido a la presencia de lombrices¹³. Por lo tanto, el proceso de compostaje-lombricompostaje ayuda a superar las desventajas de cada proceso de estabilización¹⁴.

El compost y lombricompost producidos a partir de desechos orgánicos se pueden utilizar como fertilizantes ricos en nutrientes para su aplicación como enmienda o mejoradores del suelo¹⁵. De hecho, estos procesos de descomposición biológica se consideran como una estrategia de gestión de residuos sostenible¹⁶. La literatura

⁸ WU, Ta Yeong *et al.* Biotransformation of Biodegradable Solid Wastes into Organic Fertilizers using Composting or/and Vermicomposting. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, vol. 33, pp. 1579-1584. ISSN 2283-9216.

⁹ QIAN, Xiaoyong, *et al.* Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system. *Waste Management*, 2014, vol. 34, no. 2, pp. 530-535.

¹⁰ WU. *Op. Cit.*, pp. 1579-1584

¹¹ SIM, Edwin & WU, Ta Yeong. The potential reuse of biodegradable municipal solid wastes (MSW) as feedstocks in vermicomposting. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2010, vol. 90, no. 13, pp. 2153-2162.

¹² LIM, Su Lim; LEE, Leong Hwee y WU, Ta Yeong. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 111, pp. 262-278.

¹³ DÍAZ, Eduardo. *Guía de lombricultura*. La Rioja, 2002.

¹⁴ LIM. *Op. Cit.*, pp. 262-278.

¹⁵ WU. *Op. Cit.*, pp. 1579-1584.

¹⁶ LIM. *Op. Cit.*, pp. 262-278.

muestra que estas tecnologías se han aplicado a una gran variedad de residuos (Anexo A), tal es el caso del bagazo de caña de azúcar, el cual presenta dificultades para su transformación, debido a la presencia de compuestos de difícil degradación como la lignina¹⁷. Así mismo, este desecho tiene un alto contenido de carbono, por lo que podría mezclarse con otros residuos orgánicos que tienen un elevado contenido de nitrógeno para mejorar la relación C/N inicial (25-35) de las mezclas de residuos¹⁸. Por ejemplo, podría mezclarse con residuos fácilmente disponibles, como los de alimentos que tienen altos contenidos de materia orgánica fácilmente degradable¹⁹, así como con estiércoles de animales, ya que estos almacenan buena cantidad de nutrientes (N, P, K, entre otros)²⁰. El Anexo A muestra distintos agentes de carga con los que ha sido mezclado el bagazo.

En torno a estos estudios se comprueba que no se ha realizado la mezcla de BC con EB y RAP, además no se han comparado las condiciones de proceso y variables de calidad del producto de su transformación por medio de C, L y C-L. Es importante resaltar que el EB se usa comúnmente como enmienda en el proceso de lombricompostaje, ya que es el desecho de animal más fácil para el cultivo de lombrices²¹. Por otro lado, los RAP contienen altos niveles de nitrógeno, los cuales regulan la relación C/N²². Basado en esto, el presente proyecto pretende evaluar el C, L y C-L de estos tres sustratos y analizar algunos parámetros de calidad del producto final como por ejemplo índice de germinación y estabilidad.

¹⁷ TOUMELA, M., *et al.* Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 2000, vol 72, no. 2, pp. 169-183.

¹⁸ CASTILLO, Jean Manuel; ROMERO, Esperanza y NOGALES, Rogelio. Dynamics of microbial communities related to biochemical parameters during vermicomposting and maturation of agroindustrial lignocellulose wastes. *Bioresource Technology*, 2013, vol. 146, pp. 345-354.

¹⁹ OVIEDO OCAÑA, EDGAR RICARDO, *et al.* Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality. *Waste Biomass Valor*, 2017, pp. 1-12.

²⁰ CACUA BARRETO, Luis Francisco. Producción de abonos orgánicos, aplicando procesos de compostaje y lombricompostaje a residuos de las cadenas agrícolas y pecuarias enfocado al bio-mejoramiento del agro colombiano. Pamplona, 2008. Trabajo de grado (especialidad en transformación de residuos agroindustriales). Facultad de ciencias básicas. Instituto de biocombustibles, energías alternativas y renovables-IBEAR.

²¹ EDWARDS, Clive A. *Earthworm Ecology*. 2^{da} ed. 2004. ISBN 978-0849318191.

²² CRUZ SÁNCHEZ, Walter Fernando & GARCÍA CÁRDENAS, Edgar Mauricio. Evaluación del compostaje de residuos de poda y de alimentos crudos y procesados generados en el campus central de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2016. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es la descomposición biológica de la materia orgánica llevada a cabo por microorganismos bajo condiciones controladas²³. El producto resultante, se caracteriza por ser biológicamente estable, libre de patógenos y apto para plantar semillas²⁴. Según las variaciones de temperatura, las etapas del proceso de compostaje se dividen en:

- **Etapas mesofílica (24-40 °C).** Es el periodo de adaptación de los microorganismos presentes en los residuos²⁵. El material primario comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (incluso en horas), la temperatura asciende hasta los 45 °C. Este aumento, es debido a que los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor. La descomposición de compuestos solubles como azúcares, produce ácidos orgánicos que pueden bajar el pH hasta cerca de 4,0 o 4,5²⁶.
- **Etapas termófila.** A esta fase se le llama activa, debido a que se acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica. Una vez que el material alcanza temperaturas mayores a 45 °C, los microorganismos degradan las fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina²⁷. La temperatura del material aumenta rápidamente a valores entre 65 °C y 70 °C, y puede mantenerse por días o semanas dependiendo de la descomposición de la materia orgánica, el tamaño

²³ On-Farm Composting Methods. [On line]. Available: <http://www.fao.org/docrep/007/y5104e/y5104e05.htm#TopOfPage>. [Accessed:03-ene-2019].

²⁴ CAMPOS POZUELO, Elena, *et al.* Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas, 2004.

²⁵ TCHOBANOGLIOUS, George & KREITH, Frank. Handbook of Solid Waste Management. McGraw-Hill Education, 2002, vol. 13, no. 6. ISBN 978-0071356237.

²⁶ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María M. y PANTOJA, Alberto. Manual de compostaje del agricultor. 2013. pp. 1-112.

²⁷ *Ibid.*, pp. 1-112

de la pila de compostaje y las condiciones ambientales²⁸. La alta temperatura alcanzada en esta fase también es crucial para la reducción de patógenos y la desinfección de los desechos orgánicos²⁹. Los microorganismos de esta fase transforman el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal, por lo que el pH del medio sube³⁰.

- **Etapa de enfriamiento o mesófila II.** Agotadas las fuentes de carbono y nitrógeno en el material de compostaje, la temperatura desciende hasta los 40-45°C. En esta fase continúa la degradación de polímeros y aparecen algunos hongos. Los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, manteniéndose ligeramente alcalino³¹.
- **Etapa de maduración.** A medida que los residuos orgánicos se estabilicen, la temperatura continuará disminuyendo hasta alcanzar valores cercanos a la temperatura ambiente³².

1.2 PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE

El lombricompostaje es un proceso aerobio de tratamiento de desechos sólidos en el que se utilizan lombrices para administrar y convertir residuos orgánicos en abonos de excelente calidad con la ayuda de microorganismos al promover la actividad microbiana³³. Durante el proceso de lombricompostaje, el intestino de la lombriz de tierra funciona como un biorreactor, donde tiene lugar la fragmentación, molienda, bioconversión y la mineralización de diferentes elementos presentes en

²⁸ CHEN L., *et al.* The Composting Process. 2011, Idaho: Universidad de Idaho, vol. 2, pp. 513-532.

²⁹ LIM. Op. Cit., pp. 262-278.

³⁰ Román. Op. Cit., pp. 1-112

³¹ *Ibid.*, pp. 1-112

³² SÁNCHEZ MONEDERO, Miguel A., *et al.* Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere*, 2010, vol. 81, no 1, pp. 18-25.

³³ DOMINGUEZ, Jorge & EDWARDS, Clive A. Vermicomposting organic waste: A review, *Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century*, 2004, pp. 369-395.

el sustrato³⁴. Al hacerlo, las lombrices de tierra aumentan el área de superficie de los desechos orgánicos que están expuestos a los microorganismos. De este modo, se potencia la actividad microbiana y el proceso de descomposición de los residuos sólidos³⁵. Los criterios de selección para una especie adecuada de lombriz de tierra en el lombricompostaje incluyen: altas tasas de reproducción, alto consumo de materia orgánica y alta tolerancia a diversos factores ambientales³⁶. Entre las lombrices de tierra, las lombrices epigeas son las más adecuadas para ser utilizadas en el proceso de lombricompostaje, ya que viven en espacios orgánicos y se alimentan principalmente de materia orgánica en descomposición³⁷. De las lombrices epigeas, la *Eisenia foetida* conocida también como lombriz roja californiana, es la especie de lombriz que más se emplea en lombricompostaje³⁸, lombriz que consume diariamente una cantidad de residuos equivalente, prácticamente, a su propio peso³⁹.

1.3 PROCESO DE COMPOSTAJE-LOMBRICOMPOSTAJE EN SERIE

La combinación de compostaje y lombricompostaje se ha considerado como una forma de lograr sustratos estabilizados⁴⁰. El pre-compostaje de residuos orgánicos suele durar de 2 a 3 semanas⁴¹, permite la desinfección de los desechos y la eliminación de compuestos tóxicos debido a la presencia de la etapa termofílica, lo que hace que los residuos sean más aceptables para el consumo de las lombrices y el subsiguiente lombricompostaje reduce el tamaño de las partículas y aumenta la

³⁴ PALSANIA, J., *et al.* Effect of moisture content variation over kinetic reaction rate during vermicomposting process. Applied Ecology and Environmental Research, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 49-61.

³⁵ LIM. Op. Cit., pp. 262-278.

³⁶ GARG V., GUPTA R. Vermicomposting of Agro-Industrial Processing Waste. Springer, 2009. ISBN 978-1-4020-9941-0.

³⁷ LIM. Op. Cit., pp. 262-278.

³⁸ Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodología de compostaje y lombricultura.

³⁹ TOGNETTI, C.; MAZZARINO, M. J. Y LAOS, F. Cocomposting biosolids and municipal organic waste: Effects of process management on stabilization and quality. Biology and Fertility of Soils, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 387-397.

⁴⁰ *Ibid.*, pp. 387-397.

⁴¹ LIM. Op. Cit., pp. 262-278

disponibilidad de nutrientes. Además, las lombrices de tierra pueden ayudar a voltear y mezclar los residuos orgánicos, lo que ayudará a mantener las condiciones aeróbicas durante la estabilización de la materia orgánica⁴².

1.4 PARÁMETROS DEL PROCESO

La **Tabla 1** presenta una descripción general de los parámetros fisicoquímicos del compostaje y lombricompostaje. Estos parámetros se regulan y controlan para proporcionar un entorno óptimo para que los microorganismos degraden los desechos orgánicos⁴³.

Tabla 1. Descripción de parámetros fisicoquímicos del compostaje y lombricompostaje

Parámetro	Definición y rangos óptimos	
	Compostaje	Lombricompostaje
Temperatura	El calor que se genera en el proceso de compostaje se debe a la oxidación de materia orgánica, que se refleja en una elevación de la temperatura producto de la actividad microbiana ⁴⁴ . Los rangos más comunes oscilan entre los 50 y 60°C ⁴⁵ .	El rango óptimo de temperaturas para el crecimiento de las lombrices oscila entre 20-25°C ⁴⁶ . Cuando la temperatura desciende por debajo de 15° C las lombrices entran en un período de latencia, disminuyendo su actividad ⁴⁷ .

⁴² DOMINGUEZ, Jorge & EDWARDS, Clive. Relationships between composting and vermicomposting. Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Waste Environmental Management, 2011, pp. 11-26.

⁴³ LÓPEZ GONZÁLEZ, J. A., *et al.* Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity. Bioresource Technology, 2015, vol.175, pp. 406-416.

⁴⁴ PÉREZ LOZADA, Carlos; MANZANO CASTRO, Serafi y SOLIVA TORRENTÓ, Montserrat. Compostaje conjunto de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) y residuos vegetales. Residuos revista técnica, 1999, vol. 9, no. 46.

⁴⁵ SEPÚLVEDA VILLADA, Luis Anibal & ALVARADO TORRES, Jhon Alexander. Manual de compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de Sistema de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá, 2013. ISBN 978-958-8512-69-0.

⁴⁶ Díaz. Op. Cit., pp. 1-57.

⁴⁷ RENGIFO, Diego. Lombricultivos del Valle. [En línea]. Disponible: http://www.lombricultivosdeelvalle.blogspot.com/2009_03_01_archive.html. [Acceso:04-ene-2019].

Parámetro	Compostaje	Lombricompostaje
Humedad	El agua es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células de los microorganismos ⁴⁸ . La materia orgánica tiene una humedad óptima cercana al 60%, siendo sus límites entre 40 y 70%. Debajo del 12% de humedad, cesa prácticamente la actividad microbiológica ⁴⁹ .	La humedad es uno de los factores más importantes para el funcionamiento de las lombrices de tierra y microorganismos. Las lombrices de tierra respiran a través de la piel ⁵⁰ . El rango de humedad ideal es de 70-80%. Una humedad superior al 85% hace que las lombrices entren en un período de latencia ⁵¹ .
Concentración de oxígeno	El oxígeno es esencial para el metabolismo y respiración de los microorganismos aerobios ⁵² . Concentraciones por debajo del 5% crean condiciones de anaerobiosis ⁵³ . Concentraciones mayores del 10%, se consideran óptimas para mantener un medio aeróbico ⁵⁴ .	El consumo de oxígeno es una función de la actividad microbiana y de las lombrices de tierra, los niveles de oxígeno también están relacionados con las temperaturas del sustrato ⁵⁵ .
Relación Carbono-Nitrógeno C/N	El carbono es utilizado por los microorganismos como fuente energética a través de su oxidación y el nitrógeno para la síntesis proteica ⁵⁶ . Teóricamente, la relación C/N 25-35 es la más adecuada ⁵⁷ . La relación C/N dará a conocer si existe un adecuado proceso de mineralización de la materia orgánica ⁵⁸ .	La relación C/N del material de alimentación afecta el crecimiento y la reproducción de las lombrices ⁵⁹ . La relación C/N inicial óptima es de alrededor de 30 ⁶⁰ . Si la relación C/N es demasiado alta o baja, la degradación de los desechos se reduce ⁶¹ .
pH	En el compostaje hay una sucesión de diversos microorganismos y procesos derivados de su actividad que pueden hacer que el pH varíe ⁶² . Los valores recomendados están entre 5,5 y 8 ⁶³ .	El rango de pH aceptable, adecuado para la actividad de lombrices de tierra y microorganismos, es de 5,5 a 8,5. Sin embargo, el pH recomendado es neutro o casi neutro ⁶⁴ .

⁴⁸ TSENG, David Y., *et al.* Characterization of a Bench-Scale System for Studying the Biodegradation of organic solid wastes. *Biotechnological Prog.* 1995, vol. 11, no. 4, pp. 443-451.

⁴⁹ DÍAZ. *Op. Cit.*, pp. 1-57.

⁵⁰ EDWARDS, Clive Arthur & NEUHAUSER, Edward F. *Earthworms in waste and environmental management.* SPB Academic Publishing, 1988, pp. 391. ISBN 9051030177.

⁵¹ RENGIFO. *Op. Cit.*

⁵² FALLAS CONEJO, Diego. *Caracterización del proceso de compostaje y aprovechamiento del calor generado en un reactor bajo aireación forzada.* Universidad de Costa Rica. 2016. Trabajo de grado (Ingeniería Agrícola). Escuela de Ingeniería Agrícola.

⁵³ El compost. Física del compost. [En línea]. Disponible: <http://www.miscaneros.com.ar/compost/fisica.htm>. [Acceso: 03-ene-2019].

⁵⁴ SEPÚLVEDA VILLADA. *Op. Cit.*

⁵⁵ EDWARDS. *Op. Cit.*, pp. 391.

⁵⁶ Residuos de EPS para la elaboración de compost. [En línea]. Disponible: <http://anape.es/pdf/ficha42.pdf>. [Acceso: 04-ene-2019]

⁵⁷ PELLEGRINI, Andrea. *Capacitación para el reciclado de residuos orgánicos.* Universidad Nacional de la Plata. Secretaría de Extensión Universitaria. Ed. 2. 2014. ISBN 978-987-05-4990-1.

⁵⁸ CRONJE, A. *et al.* Composting under controlled conditions. *Environmental Technology.* 2003, pp. 1221-1234.

⁵⁹ EDWARDS. *Op. Cit.*, pp. 391.

⁶⁰ LIM. *Op. Cit.*, pp. 262-278.

⁶¹ EDWARDS. *Op. Cit.*, pp. 391.

⁶² PELLEGRINI. *Op. Cit.*

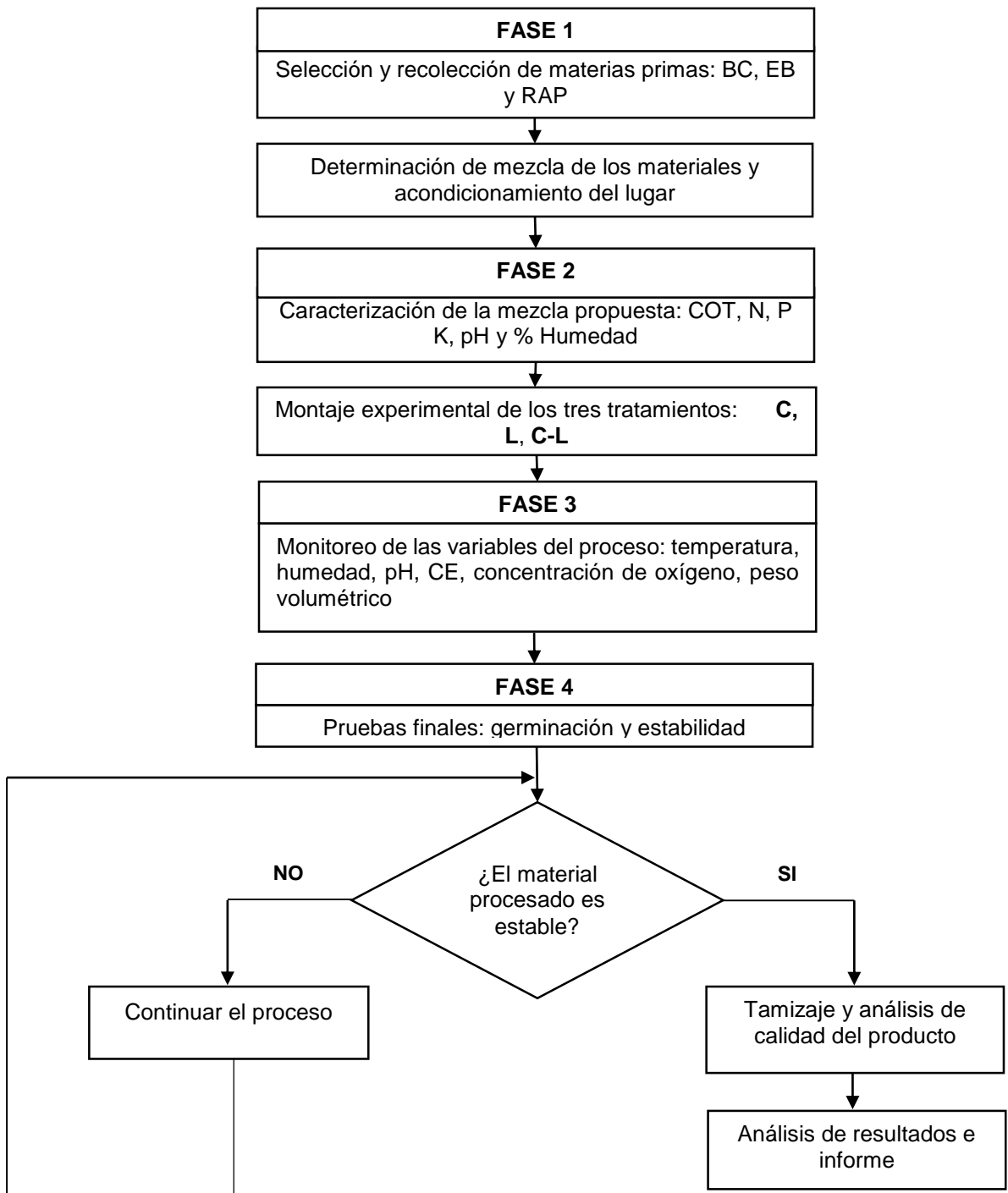
⁶³ BERTOLDI, M.; VALLINI, G. y PERA A. *The Biology of Composting: A Review.* *Waste Management & Research.* 1983, vol. 1, no. pp. 157-176.

⁶⁴ EDWARDS. *Op. Cit.*, pp. 391.

2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

El esquema metodológico planteado en este proyecto se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1. Diagrama metodológico.



El presente trabajo se realizó en el campus central de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en la ciudad de Bucaramanga, Santander (Colombia), mediante el montaje de pruebas piloto. Las pruebas de monitoreo del proceso y de estabilidad del producto, se realizaron en el laboratorio de investigación del grupo Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Escuela de Ingeniería Civil.

2.1 MATERIAS PRIMAS

El BC se obtuvo de un molino ubicado en el municipio de Piedecuesta Santander, se trituró manualmente hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 5 cm, con el fin de favorecer su proceso de descomposición. Por otra parte, el EB se recolectó fresco (1 día de generación) del frigorífico Rio Frio situado en Floridablanca Santander, se extendió bajo la luz solar durante 2 semanas como recomienda Garavito et al. (10-18 días)⁶⁵, con el propósito de disminuir su alto contenido de humedad y aumentar su periodo de maduración. En cuanto a los RAP, se recopilaron con la ayuda de bienestar universitario sección de comedores (UIS), estos se recolectaron dos días antes de realizar el montaje.

2.1.1 Determinación de la mezcla de los materiales y acondicionamiento del lugar:

El acondicionamiento del lugar de trabajo requirió la limpieza de las camas en las que se realizó la experimentación. Se diseñó una mezcla con un peso total de 282 kg la cual fue distribuida de manera equitativa (94 kg) para cada uno de los tres tratamientos (C, L y C-L); cada tratamiento estuvo conformado por 35,64% RAP, 32,45% EB y 31,91% BC (p/p). Con la ecuación de Trautmann & Krasny⁶⁶ se calculó

⁶⁵ GARAVITO NANJAS, Jenny Zorayda; MORALES POSADA, Nelly Bibiana y CHÁVEZ PORRAS, Álvaro. Descripción de metodologías del Sistema de lombricultura para gestión de residuos sólidos orgánicos.

⁶⁶ TRAUTMANN, Nancy M. & KRASNY, Marianne E. Composting in the classroom. Scientific Inquiry for High School Students. 1997. ISBN 0-7872-4433-3.

la relación C/N inicial de la mezcla, utilizando valores teóricos como el porcentaje de carbono y nitrógeno para cada sustrato obtenidos de la literatura con el fin de lograr una relación cercana a 30, esta se definió de acuerdo con los rangos recomendados en la literatura para los tratamientos de compostaje y lombricompostaje, los cuales son 25-35 y 30 respectivamente^{67 68} (Anexo B).

2.2 CARACTERIZACIÓN Y MONTAJE

Se tomó una muestra de la mezcla inicial luego de homogenizarse por medio del método del cuarteo⁶⁹ y se llevó al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander, donde se efectuaron los siguientes análisis: carbono orgánico oxidable total (COT), nitrógeno total (N), fósforo total (P), potasio total (K), pH y humedad, siguiendo protocolos de la norma técnica colombiana NTC 5167.

Para el montaje del proceso se emplearon 3 camas de concreto a nivel de piso. Dentro de una de las camas se inició con el montaje de la pila en forma cónica para el tratamiento C (**Figura 2a**). Posteriormente, se diseñó la cama para el tratamiento L, con unas dimensiones fijas 0,94 m, 1,21 m y 0,15 m de largo, ancho y alto respectivamente (**Figura 2b**); luego, se agregó 1 kg de lombriz por metro cuadrado como lo recomienda el manual de compostaje del agricultor⁷⁰. Finalmente, el tratamiento C-L se diseñó bajo las mismas condiciones del tratamiento C (**Figura 2c**), puesto que este incluía un precompostaje, el cual suele durar entre dos y tres semanas e incluye la estabilización térmica y el inicio de la degradación microbiana, lo que hace que los residuos tratados sean más aceptados para el consumo de la

⁶⁷ LIM. Op. Cit., pp. 262-278.

⁶⁸ CRONJE. Op. Cit., pp. 1221-1234.

⁶⁹ Instituto nacional de vías (INVIAS). I.N.V.E-104-07. Procedimiento para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.

⁷⁰ Román. Op. Cit., pp. 1-112.

lombriz de tierra⁷¹; en este caso se precompostó por un periodo de 23 días. Después de esta etapa se adicionaron las lombrices en la misma proporción del tratamiento L (1 kg). Las camas de los tratamientos L y C-L se cubrieron con una polisombra del 50% (lombrices fotofóbicas).

Figura 2. (a) Pila C, (b) Cama L, (c) Pila C-L



2.3 MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

La medición de parámetros como temperatura, pH, porcentaje de humedad, CE, peso volumétrico y concentración de oxígeno, se midieron durante 10 semanas en todos los tratamientos. La frecuencia de volteo se realizó manualmente empleando una pala, acorde a los requerimientos de los procesos, con el fin de mantener las condiciones óptimas, tales como temperatura, humedad, concentración de oxígeno entre otras. A continuación, se mencionarán los parámetros monitoreados en los tres tratamientos a lo largo de la experimentación:

- **Temperatura:** la temperatura se monitoreó diariamente en el centroide de las pilas, mientras que en cada una de las camas se midió en 3 puntos centrales y se registró una temperatura promedio. Estas fueron tomadas con un termómetro digital HI935005N (HANNA instruments) que ofrece mediciones de temperatura de alta precisión, usando una sonda K-type thermocouple probe H1766TR1 de 60 cm.

⁷¹ LIM. Op. Cit., pp. 262-278.

- **Humedad:** se midió dos veces por semana, tomando muestras en diferentes puntos de las pilas y camas, empleando un medidor de humedad Ohaus MB-35 (OhausCorporation, PineBrook, NJ), en el cual se colocaron **4 g** de muestra a una temperatura de 105°C. Con el fin de mantener los rangos apropiados para cada uno de los tratamientos se realizaron una serie de humectaciones a lo largo del proceso, estas se hicieron cuando las humedades estaban por debajo del rango 70-80% para el tratamiento L y de 50-60% para el tratamiento C.
- **pH:** se monitoreó dos veces por semana, se preparó una solución acuosa de 10 g de muestra con 100 ml de agua destilada, acorde con Monireh et al.⁷² y se dejó reposar durante una hora⁷³; esta se analizó con un pH metro sensION™+ MM374 (HACH).
- **CE:** este parámetro indica la cantidad de sales disueltas presentes en una solución. Los periodos de medición, solución acuosa y equipo son los mismos que se emplearon para el cálculo del pH.
- **Concentración de oxígeno:** se monitoreó semanalmente. La medición se realizó con una sonda CM37 (Umwelt Elektronik GmbH & Co. KG) que registra valores en porcentaje de oxígeno y temperatura.
- **Peso volumétrico o densidad aparente:** al igual que la concentración de oxígeno, se calculó una vez por semana, empleando una cubeta plástica con capacidad de 5 litros y una balanza de 5 kg. La cubeta se llenó con material, luego se pesó en la balanza con el fin de obtener la relación entre el peso de material y el volumen ocupado. Este parámetro se monitoreó solo para el tratamiento C, debido

⁷² MONIREH, Majlessi, *et al.* Vermicomposting of food waste: assessing the stability and maturity. Iranian Journal Environmental Health Science and Engineering, 2012, vol. 9.

⁷³ CIFUENTES, Rolando; De León, Roberto y PORRES, Carlos. Producción de abono orgánico a partir de cachaza y tallos de caña de azúcar recuperados de las carreteras. Revista 23 de la Universidad del Valle de Guatemala, 2011, pp. 8-17.

a que los tratamientos L y C-L contenían lombrices que son sensibles a la manipulación.

Cabe mencionar que desde el día 33 hasta el día 37 del proceso, no se realizaron mediciones de ningún tratamiento, debido al cierre del campus central de la universidad.

2.4 GERMINACIÓN, ESTABILIDAD Y CALIDAD DEL PRODUCTO

2.4.1 Prueba de germinación: según Varnero et al.⁷⁴, la prueba de germinación permite determinar los niveles de fitotoxicidad del producto obtenido, según la norma Chilena de Compost Nch 2880, la cual indica que un compost es maduro si el porcentaje de índice de germinación es mayor o igual al 80%⁷⁵.

El ensayo requirió el uso de 3 placas Petri para cada tratamiento y 3 adicionales para el control con agua destilada para un total de 12 placas. Se prepararon extractos en proporción de 1:10 (muestra: agua destilada), esta mezcla se dejó reposar durante tres horas para luego ser filtrada. Se colocaron 10 ml de cada extracto en cada una de las placas Petri, que contenían 10 semillas de rábano (especie que presenta mayor sensibilidad a sustancias fitotóxicas) sobre papel filtro y se dejaron en reposo durante 72 horas. Según el procedimiento descrito por Tiquia⁷⁶ las fórmulas empleadas para realizar las mediciones fueron:

⁷⁴ VARNERO, María Teresa; ROJAS, Claudia y ORELLANA, Roberto. Índices de fitotoxicidad de residuos orgánicos durante el compostaje. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, 2007, vol. 7, no. 1, pp. 28-37.

⁷⁵ INN, Norma chilena de compost 2880-2004 (Nch 2880-2004), Compost – Clasificación y Requisitos, 2004, p. 27.

⁷⁶ TIQUIA ARASHIRO, S. Evaluating Phytotoxicity of Pig Manure from the Pig-on-Litter System. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering. The Ohio State University, 1999, pp. 625-647.

Porcentaje de germinación relativo (PGR)

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el extracto}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

Crecimiento de radícula relativo (CRR)

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}} \times 100$$

Índice de germinación (IG)

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100}$$

2.4.2 Prueba de estabilidad: esta prueba se realiza para determinar el grado de estabilidad de un compost. El equipo que se empleó fue un dispositivo de medición Rotting Degree Measuring System RM 82 (Umwelt Elektronik GmbH & Co. KG) que mide la calidad o madurez del producto, el cual está diseñado con la normativa europea para la maduración del compost. Este método clasifica el compost en cinco niveles de intervalos de aumento de temperatura (autocalentamiento) de 10°C cada uno. Según el test de Dewar, los niveles IV y V corresponden a un compost estabilizado, mientras que los niveles I, II y III corresponden a un compost inmaduro⁷⁷. Las escalas empleadas para la determinación del grado de estabilidad se presentan en el Anexo C.

⁷⁷ BRINTON Jr, William F, et al. A Standardized Dewar Test For Evaluation Of Compost Self-Heating. Biocycle Report, 1992, pp. 1-16.

2.4.3 Tamizaje y análisis de calidad del producto: Al final de los tres procesos se realizó un tamizado manual de los productos empleando un tamiz de 1 cm. Luego se tomó una muestra representativa del material cernido para cada uno de los tres tratamientos para realizarle el análisis fisicoquímico final; estas muestras se llevaron al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander donde se analizaron COT, N, P, K, pH y humedad, a fin de comparar las características de los productos obtenidos con la norma técnica colombiana NTC 5167 para productos orgánicos utilizados como fertilizantes y enmiendas o acondicionadores del suelo⁷⁸.

⁷⁸ Norma Técnica Colombiana. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

La **Tabla 2** reporta las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de los sustratos BC, EB y RAP.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de la muestra inicial

Muestra Inicial	pH	Humedad (%)	COT (%C) bs	N total (%N) bs	Potasio total (%K ₂ O) bs	Fósforo total (%P ₂ O ₅) bs	C/N
	4,64	72,76	27,39	3,41	1,69	5,18	8,03

Nota: COT: Carbono Orgánico Oxidable Total; NT: Nitrógeno Total; bs: Base seca.

Se aprecia que la muestra inicial, conformada por BC, EB y RAP tiene un valor de humedad de 72,76% que se encuentra entre los rangos establecidos para el tratamiento L (70-80%)⁷⁹, mientras que para los tratamientos C y C-L este valor sobrepasa los límites según Trautmann y Krasny (50-60%)⁸⁰. Por otro lado, se esperaba una relación C/N inicial de la mezcla alrededor de 30, la cual se calculó con la ecuación de Trautmann teniendo en cuenta composiciones promedio de los sustratos reportados en la literatura. Sin embargo, la relación obtenida fue de 8,03, la cual se considera baja, esto podría indicar que hay un exceso de N el cual podría perderse en forma de amoníaco^{81 82 83}. Estas pérdidas, si bien no afectan negativamente el compostaje, suponen un derroche, dado que el nitrógeno es el

⁷⁹ Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodología de compostaje y lombricultura

⁸⁰ TRAUTMANN. Op. Cit.

⁸¹ LIM. Op. Cit., pp. 262-278.

⁸² DÍAZ. Op. Cit., pp. 1-57

⁸³ Román. Op. Cit., pp. 1-112.

nutriente fundamental para los cultivos. Además, el amoníaco ocasiona un problema medio ambiental, ya que es un gas con un considerable efecto invernadero⁸⁴.

Los resultados obtenidos para COT, N, P y K fueron 27,39%, 3,41%, 5,18% y 1,69% respectivamente; todos estos son esenciales para el buen desarrollo de procesos de transformación de la materia orgánica (C, L y C-L). Cabe aclarar que no se realizaron caracterizaciones de los sustratos BC, EB y RAP por separado debido a limitaciones de presupuesto.

3.2 MONITOREO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

3.2.1 Temperatura: el monitoreo de este parámetro requirió mediciones hasta el día 68 para cada uno de los tres tratamientos. El comportamiento de las temperaturas para los tratamientos C, L y C-L se puede observar en la **Figura 3**. Como se evidencia para el tratamiento C, la etapa mesofílica se desarrolló rápidamente hasta temperaturas inferiores a 45 °C con un periodo no mayor a 1 día similar a lo reportado por los autores Oviedo et al.⁸⁵ y Hernández⁸⁶, cabe mencionar que estos autores emplearon distintos tipos de sustratos; este aumento de temperatura podría estar relacionado con la presencia de material de fácil degradación como carbohidratos, proteínas y aminoácidos provenientes de los RAP⁸⁷. Posteriormente, se produjo la liberación de calor característico de la etapa termofílica alcanzando un valor de 66,1°C, probablemente, por el catabolismo microbiano de residuos orgánicos como lo mencionan Sing & Kalamdhad⁸⁸. A partir

⁸⁴ BUENO MÁRQUEZ, Pedro; DÍAZ BLANCO, Manuel y CABRERA CAPITÁN. Factores que afectan al proceso de compostaje. pp. 1-16.

⁸⁵ OVIEDO OCAÑA. Op. Cit., pp. 1-12.

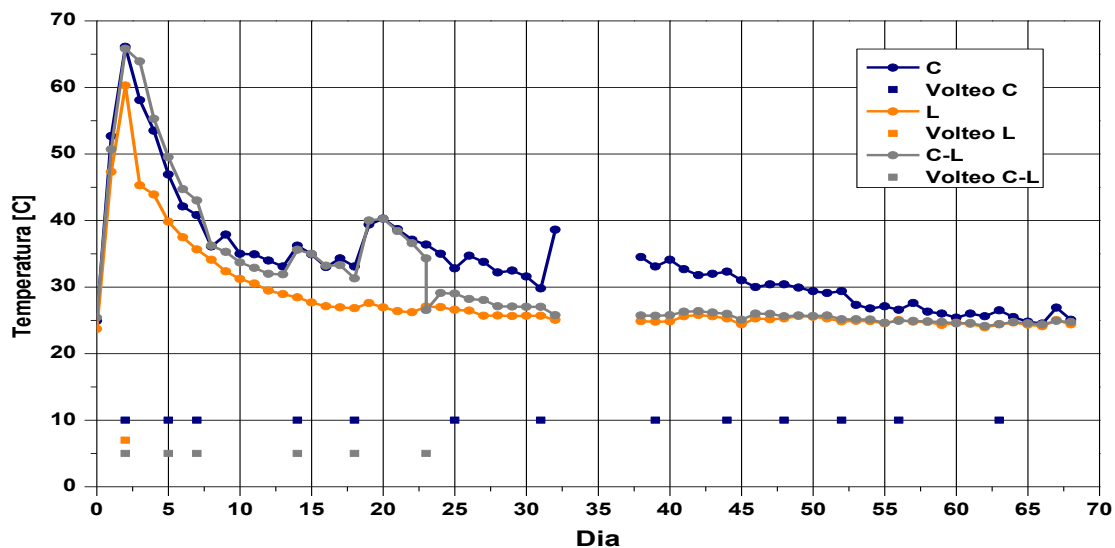
⁸⁶ HERNÁNDEZ GÓMEZ, Angélica María. Evaluación del proceso del compostaje de pollinaza fresca y otros materiales orgánicos generados en el páramo de Berlín. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

⁸⁷ OVIEDO OCAÑA, *et al.* Effect of adding bulking materials over the composting process of municipal solid biowastes. Chilean Journal of Agricultural Research, 2015, vol. 75, no. 4, pp. 472-480.

⁸⁸ SING, W. Roshan & KALAMDHAD, Ajay S. Potential for composting of green phumdi biomass of Loktak lake. Ecological Engineering, 2014, vol. 67, pp. 119-126.

del día 6 y hasta el día 52 se presentó la etapa de enfriamiento, en este periodo se realizaron humectaciones y volteos según los requerimientos del proceso. Después del día 52 se dio la etapa de maduración, caracterizada por alcanzar temperaturas cercanas a la ambiente ($25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$); además, al realizar los volteos en los días 56 y 63 no se presentaron variaciones significativas de temperatura en el proceso.

Figura 3. Comportamiento de la temperatura para C, L y C-L.



En el caso del tratamiento L, se presentaron elevaciones de temperatura excesivas (40-60°C) en los primeros días del proceso hasta el punto de ser necesario airear la cama en el día 2; estas temperaturas no son apropiadas para este tratamiento, ya que el rango óptimo para el crecimiento de la lombriz oscila entre 20 y 25 °C⁸⁹. A partir del día 11 la temperatura descendió de los 30 °C y favoreció las condiciones óptimas para el buen desempeño de la lombriz, como temperaturas cercanas a la ambiente (25°C), pH entre 5,5 y 8,5 y humedades entre 70 y 80%^{90 91 92}. En el tratamiento C-L se evidenció un comportamiento similar al del tratamiento C hasta

⁸⁹ DÍAZ. Op. Cit., pp. 1-57.

⁹⁰ Román. Op. Cit., pp. 1-112.

⁹¹ RENGIFO. Op. Cit.

⁹² EDWARDS. Op. Cit., pp. 391.

el día 23, estos resultados son similares a los reportados por Suthar et al.⁹³; sin embargo, estos autores emplearon distintos tipos de sustratos (estiércol de vaca, caña de azúcar, paja de trigo y lodos del procesamiento de leche); durante estos días se presentaron las etapas, mesofílica (día 0-1), termofílica (día 1-6) y enfriamiento (día 6-23), como se observa en la **Figura 3**. A partir de ahí se desarrolló el tratamiento de la misma forma que el tratamiento L. Para todos los tratamientos las temperaturas termofílicas se alcanzaron en 1 día probablemente debido a la presencia de RAP, los cuales contienen compuestos rápidamente degradables.

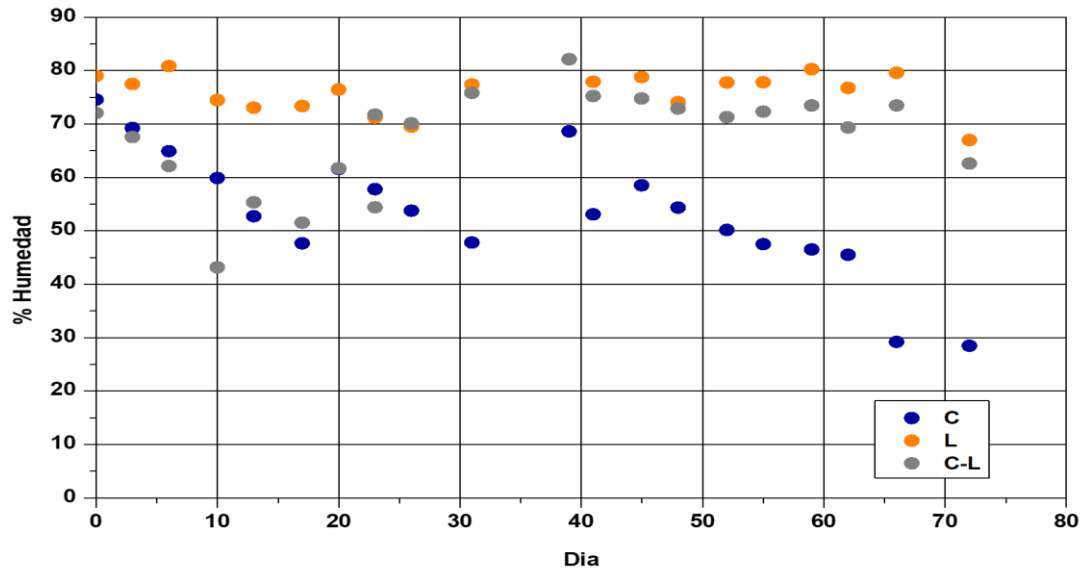
3.2.2 Humedad: la **Figura 4** muestra el comportamiento de la humedad para los tres tratamientos. Con el fin de mantener los porcentajes de humedad entre los rangos óptimos recomendados para los tres tratamientos, a lo largo del proceso se realizaron una serie de humectaciones cuando estos presentaban porcentajes de humedad inferiores al 50% y 70% para los tratamientos C y L, respectivamente. Las humectaciones se realizaron de forma tal que la mezcla de material presente en las camas y pilas se humedeciera de manera uniforme.

Como se evidencia en la figura, el comportamiento de la humedad para los tres tratamientos se logró mantener entre los rangos establecidos durante gran parte de la experimentación. No obstante, al final de los tres procesos se dejó de humectar el material, ya que las pruebas finales indicaban que los productos eran estables y maduros. Por otro lado, según la Norma Técnica Colombiana (NTC 5167)⁹⁴ los productos de compost y lombricompost deben presentar humedades por debajo del 35%, para poder ser utilizados como acondicionadores del suelo. Cabe mencionar que, la humedad para el tratamiento C-L el día 23 pasó de 55.41% a 71.74%, puesto que el proceso requería la humectación debido a la adición de la lombriz.

⁹³ SUTHAR, Surindra; MUTIYAR, Pravin K y SINGH, Sushma. Vermicomposting of milk processing industry sludge spiked with plant wastes. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 116, pp. 214-219.

⁹⁴ Norma Técnica Colombiana. Op. Cit.

Figura 4. Comportamiento de la humedad para los tratamientos C, L y C-L



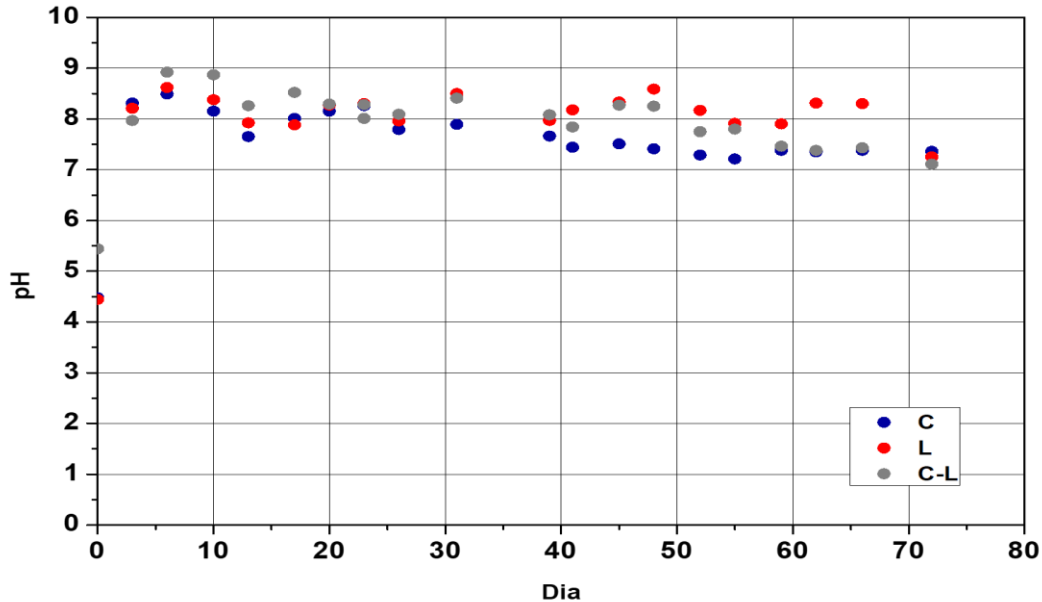
3.2.3 pH: la **Figura 5** muestra el comportamiento del pH para cada uno de los tres procesos. El pH inició en el rango ácido para los tres tratamientos, esto puede estar asociado a la transformación de la materia orgánica por la degradación aerobia o anaerobia durante el periodo de almacenamiento; por ejemplo, los RAP generan ácidos orgánicos como productos intermedios del proceso metabólico de las bacterias⁹⁵. Posteriormente, el pH aumentó a valores entre 7,65-8,49, 7,88-8,62 y 7,97-8,92 para los tratamientos C, L y C-L, respectivamente; esto se dio probablemente por la liberación de CO₂, la generación de amoníaco a partir de la descomposición de las proteínas y la aireación de la biomasa^{96 97}. Al final del proceso, los valores de pH fueron muy similares para los tres tratamientos, 7,36, 7,25 y 7,11 para C, L y C-L, respectivamente.

⁹⁵ DIAZ, L. F, *et al.* Compost Science and Technology. Waste Management Series, 2007, vol. 8, pp. 1-364.

⁹⁶ OVIEDO. Op. Cit., pp. 1-12

⁹⁷ SÁNCHEZ MONEDERO, Miguel, *et al.* Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. Bioresource Technology, 2001, vol. 78, no. 3, pp. 301-308.

Figura 5. Comportamiento del pH para los tratamientos C, L y C-L.



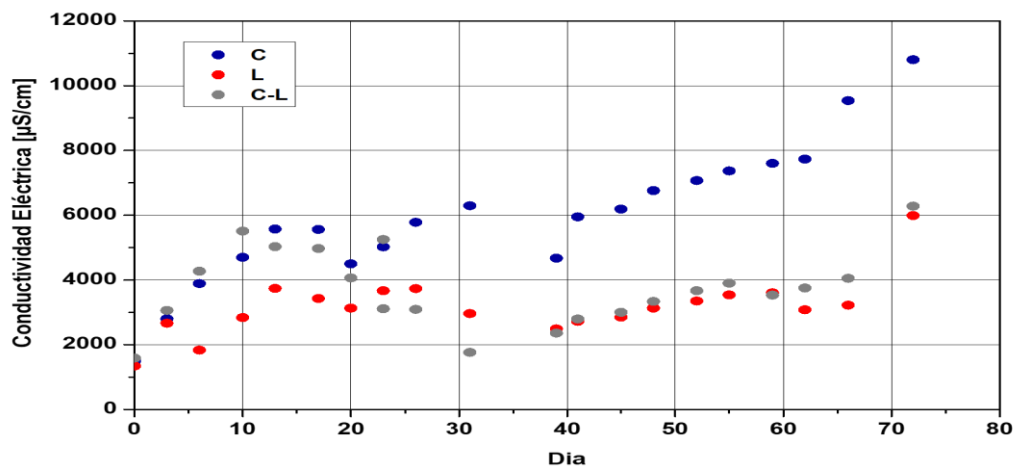
3.2.4 Conductividad eléctrica (CE): la CE refleja la salinidad de un material orgánico. La alta concentración de sal puede causar problemas de fitotoxicidad, siendo la conductividad un buen indicador de la idoneidad y seguridad de un compost o lombricompost para fines agrícolas⁹⁸. La **Figura 6** muestra que hay diferencias entre los valores de CE durante el proceso previo de compostaje e inicio del lombricompostaje para el tratamiento C-L, ya que pasó de 5.250 a 3.110 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], este descenso pudo haber sido causado por la precipitación de las sales disueltas al humectar el material el día de la adición de la lombriz (día 23)⁹⁹.

⁹⁸ LAZCANO, Cristina; GÓMEZ BRANDÓN, María y DOMÍNGUEZ, Jorge. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*, 2008, vol. 72, pp.1013-1019.

⁹⁹ MENDOZA, Daicy de Jesús. Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal. Valencia, 2010. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal.

Luego de la etapa de precompostaje los tratamientos L y C-L presentaron valores de CE muy similares hasta el final del proceso, estos estuvieron entre 2.360 y 6.280 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. La CE para los tratamientos L y C-L presentó valores inferiores respecto al tratamiento C desde el día 23 hasta finalizar el proceso, esta diferencia puede estar relacionada según Lazcano¹⁰⁰, a la presencia de lombrices, las cuales promueven la reducción de este parámetro. Según la literatura los valores de CE para los procesos de compostaje tienden a ser mayores que los de lombricompostaje, como reporta Mendoza¹⁰¹, quien obtuvo valores hasta cuatro veces superiores en los tratamientos, es importante resaltar que los sustratos que utilizaron fueron restos del cultivo de tomate y cáscaras de almendras. Los valores de CE en los productos obtenidos para los tres tratamientos fueron altos en comparación con los requeridos para un producto estable y maduro ($<4000 \mu\text{S}/\text{cm}$)¹⁰².

Figura 6. Comportamiento de la conductividad eléctrica para C, L y C-L.



3.2.5 Concentración de oxígeno: la concentración de oxígeno permitió mantener los tres tratamientos en un comportamiento aerobio realizando volteos periódicamente según los requerimientos del proceso.

¹⁰⁰ LAZCANO. Op. Cit., pp. 1013-1019

¹⁰¹ MENDOZA. Op. Cit.

¹⁰² OVIEDO. Op. Cit., pp. 1-12

Durante los primeros días, los niveles de oxígeno fueron inferiores al 80%, por lo cual se realizaron volteos los días 2, 5 y 7; la principal razón de esta disminución se dio debido a la actividad microbiológica, la cual requiere mayor demanda de oxígeno y a su vez aumentan la concentración de dióxido de carbono (CO₂), como reporta Trautmann & Krasny¹⁰³. Desde el día 10 en adelante, la aireación fue necesaria para favorecer la homogeneidad de la mezcla, garantizar una etapa termófila completa y disminuir la humedad en los procesos.

El tratamiento L en los primeros días del proceso presentó una concentración de oxígeno del 3%, esta pudo ser causada por la altura de la cama la cual era de 30 cm, lo que limitó la concentración de oxígeno en el interior de la misma, afectando el desempeño de la lombriz. Por ende, se redujo la altura de la cama a la mitad, desde ese momento el tratamiento L presentó condiciones aeróbicas. Por otra parte, los tratamientos C y C-L mostraron un comportamiento aerobio durante todo el proceso con valores superiores al 20% (concentración normal en el aire).

3.2.6 Peso volumétrico: se observa una disminución progresiva en el peso volumétrico (densidad aparente) en el tratamiento C, asociada a la disminución en el contenido de humedad del material. Algunos incrementos (días 39 y 59) están relacionados a la humectación de la pila, como se evidencia en el Anexo D. Al final del proceso el peso volumétrico fue cercano a 0,14 g/cm³, lo cual es consistente con lo reportado para este tipo de productos¹⁰⁴. La disminución de este parámetro 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 como reporta Oviedo et al.¹⁰⁵.

¹⁰³ TRAUTMANN. Op. Cit.

¹⁰⁴ Román. Op. Cit., pp. 1-112.

¹⁰⁵ OVIEDO OCAÑA, Edgar Ricardo, *et al.* Influencia de la incorporación de pasto estrella como material de soporte (*cynodon Plectostachyus*) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. Ingeniería y desarrollo, 2013, vol. 31, no. 2, pp. 251-271.

3.3 MADUREZ, ESTABILIDAD Y CALIDAD DEL PRODUCTO FINAL

3.3.1 Prueba de germinación: la prueba de germinación se realizó los días 48, 55 y 62 del proceso. Adicionalmente, el día 123 (51 días después de finalizados los procesos) se llevó a cabo una prueba de control para los productos de los tres tratamientos. Los valores obtenidos señalan que el índice de germinación (IG) para el tratamiento C (día 123) respecto a los días anteriores, es inferior al 80% como se evidencia en la **Figura 7**, lo que indicaría que el producto contiene sustancias fitotóxicas que no se han metabolizado completamente¹⁰⁶. El producto con valores altos de CE presenta comportamientos fitotóxicos que pueden afectar la germinación de las semillas¹⁰⁷, esto concuerda con el valor de CE reportado el día de la prueba de control (día 123), el cual fue de 12.160 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los datos demuestran que probablemente el tratamiento C aún se encuentra en estado de descomposición de los compuestos orgánicos que conllevan a la generación de compuestos fitotóxicos¹⁰⁸, siendo necesario prolongar el tiempo para la maduración del material.

De otro lado, los tratamientos L y C-L presentaron valores de IG superiores al 80%, con lo cual, de acuerdo con la Norma Chilena NCh 2880¹⁰⁹, el material no presenta fitotoxicidad. Cabe señalar que, aunque el IG para los tratamientos L y C-L fue superior al 80%, el día 123 (prueba de control) se presentó un descenso del mismo, que podría estar relacionado con los valores de CE que se presentaron ese día, los cuales fueron de 7.070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 7.320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para L y C-L, respectivamente. Este aumento de CE días después de haber finalizados los procesos, según Kiefer¹¹⁰,

¹⁰⁶ VARNERO. Op. Cit., pp. 28-37

¹⁰⁷ MANIOS, T. The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. Environment International, 2004, vol.29, no. 8, pp. 1079-1089.

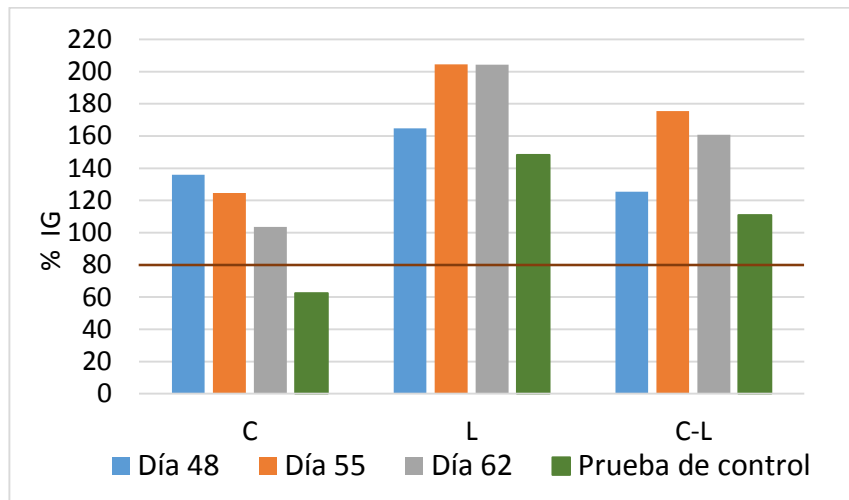
¹⁰⁸ OVIEDO OCAÑA, Edgar Ricardo, *et al.* Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. Waste Management, 2015, vol. 44, pp. 63-71.

¹⁰⁹ Norma chilena de compost. Op. Cit., p. 27.

¹¹⁰ KIEFER, Andi. The Effects Storage on the Quality of Vermicompost. University of Wisconsin. System solid waste research program. Student Project Report, 2012.

podría deberse a una mayor concentración de iones por la pérdida de materia orgánica que se presenta cuando los productos son almacenados.

Figura 7. Porcentaje de índice de germinación para los tratamientos C, L y C-L.



3.3.2 Prueba de estabilidad: según Mohedo ¹¹¹, a medida que los microorganismos degradan los residuos, el calor generado por la actividad metabólica aumenta hasta superar el calor que se disipa, lo que lleva a un incremento de la temperatura de la masa que se está compostando. La prueba de estabilidad se realizó para cada uno de los tratamientos, los cuales presentaron comportamientos favorables según Dulac ¹¹² y Raj ¹¹³, quienes consideran un proceso de compostaje finalizado si la temperatura en el centro de una pila se encuentra dentro de un rango de ± 5 °C con respecto a la temperatura ambiente.

¹¹¹ MOHEDO GATÓN, Juan José. Estudio de la estabilidad durante el compostaje de residuos municipales. Tesis doctoral Universidad de Córdoba. Facultad de ciencias. Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química.

¹¹² DULAC, Nadine. The organic Waste Flow in Integrated Sustainable Waste Management. Tools for Decision-makers. Experiences from the Urban Waste Expertise Programme, 2001.

¹¹³ RAJ, Dev & ANTIL, R. S. Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. Bioresource Technology, 2012, vol. 58, no 8, pp. 817-832.

Teniendo en cuenta los deltas de temperatura, los tres tratamientos tienen un grado de estabilidad V, es decir, variaciones entre 0 °C y 10°C desde el inicio del proceso hasta su finalización (Anexo E), siendo este un criterio para compost finales muy estables, según Brinton et al.¹¹⁴. Cabe mencionar que las fluctuaciones que se evidencian en las figuras del Anexo E, podrían deberse a variaciones de temperatura en el laboratorio. Las pruebas se llevaron a cabo durante un periodo mínimo de 7 días, hasta que se observó un comportamiento constante en la temperatura.

3.3.3 Análisis de calidad del producto: las propiedades del compost varían ampliamente, dependiendo de los sustratos, el proceso utilizado y la edad del compost¹¹⁵. En la **Tabla 3** se muestran los resultados finales para cada uno de los tratamientos y su comparación con la Norma Técnica Colombiana (NTC-5167)¹¹⁶ para el uso de productos orgánicos como fertilizantes.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos finales

Parámetro	C	L	C-L	NTC 5167
pH	7,18	7,08	6,86	>4 y <9
Humedad [%]	28,50	67,02	62,60	<35%
COT [%C] bs	18,27	22,71	23,69	>15%
N total [%N] bs	3,52	4,21	3,18	>1%
Potasio total [K ₂ O] bs	4,69	6,49	4,30	>1%
Fósforo total [%P ₂ O ₅] bs	2,92	4,28	2,97	>1%
C/N	5,18	5,39	7,45	-

Nota: COT: Carbono Orgánico Oxidable Total; N: Nitrógeno Total; bs: Base seca.

La **Tabla 3** indica que el pH para cada uno de los productos presentó valores cercanos al neutro, lo que concuerda con el rango establecido por la NTC 5167. Según Torres et al.¹¹⁷, el rango de pH aceptable para ser utilizado como enmienda

¹¹⁴ BRINTON. Op. Cit., pp. 1-16

¹¹⁵ TRAUTMANN. Op. Cit.

¹¹⁶ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Op. Cit.

¹¹⁷ TORRES, Patricia, *et al.* Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*, 2007, vol. 27, no. 1, pp. 267-275.

para el suelo generalmente está entre 6.5 y 8. Además, estos valores suelen ser indicadores de estabilidad¹¹⁸. Con relación a la humedad, el tratamiento C se ajusta a la norma NTC 5167, mientras que los tratamientos L y C-L sobrepasan lo recomendado, con valores de 67.02% y 62.60% respectivamente, puesto que estos requerían contenidos altos de humedad para un mejor desempeño de las lombrices, por lo que se recomienda secar el material del producto final, con el fin de obtener humedades acordes con el rango establecido por la NTC 5167 (<35%) para los mejoradores de suelo. No obstante, Oviedo et al.¹¹⁹ indican que los niveles de humedad altos en productos estables no son inconvenientes para el proceso de maduración, pero podrían serlo para las actividades de comercialización del producto (manipulación, transporte y aplicación).

En cuanto al COT, para los tres tratamientos, los valores fueron superiores al 15% acorde con la NTC. El COT de los productos finales disminuyó respecto a la muestra inicial, esto puede deberse a la actividad respiratoria de las lombrices de tierra y los microorganismos¹²⁰. Las lombrices modifican la condición del sustrato promoviendo las pérdidas de carbono a través de la respiración microbiana en forma de CO₂ e incluso a través de la mineralización de la materia orgánica¹²¹.

Los valores de N para cada uno de los procesos se ajustan a la norma NTC. Así mismo, el N fue más alto en el producto L, probablemente por la transformación de la masa, la cual genera retención de nitrógeno^{122 123 124}. En relación con el K, este aumentó al final de todos los procesos, lo cual puede deberse a la formación de

¹¹⁸ MONIREH. Op. Cit.

¹¹⁹ OVIEDO. Op. Cit., pp. 1-12.

¹²⁰ CURRY, J. P.; BYRNE, D. y BOYLE K. E. The earthworm of a winter cereal field and its effects on soil and nitrogen turnover. *Boil Fertil Soils*, 1995, vol. 19, no. 2-3, pp. 166-172.

¹²¹ BANSAL, Sudha & KAPOOR, Krishan. Vermicomposting of crop residues and cattle dung with *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology*, 2000, vol. 73, no. 2, pp. 95-98.

¹²² DÍAZ. Op. Cit., pp. 1-364.

¹²³ PANDEY, P. K, et al. A new closed loop heating system for composting of green and food wastes. *Journal of Cleaner Production*, 2016, pp. 1252-1259.

¹²⁴ STENTIFORD, E. & de BERTOLDI, M. Composting process. In: Christensen, T (ed). *Solid Waste Technology Management*, 2010, vol. 1-2.

ácido durante la descomposición de los desechos por microorganismos¹²⁵. Suthar¹²⁶ y Yadav et al.¹²⁷ observaron que el lombricompostaje aumenta significativamente la concentración de K, por lo que el tratamiento L presentó un mayor incremento en la cantidad del mismo. Todos los valores de contenido de K cumplen con lo establecido por la NTC. El P desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano y el crecimiento vegetal¹²⁸. El contenido total de P muestra que cumple con el valor mínimo de la NTC para ser utilizado como un mejorador de suelo.

La relación C/N se utiliza como índice de madurez de los residuos orgánicos, así como un parámetro muy importante porque las plantas no pueden asimilar el nitrógeno a menos que la relación sea del orden de 20 o menos¹²⁹. En este estudio la relación C/N para los tres tratamientos disminuyó respecto a la muestra inicial, quizá por la dinámica del carbono, el cual tiende a disminuir como consecuencia de la oxidación de la materia orgánica¹³⁰. Cabe resaltar que la menor variación en la relación C/N del producto final se presentó para el tratamiento C-L.

¹²⁵ ADI, A. J. & NOOR, Zalina M. Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, no. 2, pp. 1027-1030.

¹²⁶ SUTHAR, Surindra. Bioconversion of post harvest crop residues and cattle shed manure into value-added products using earthworm *Eudrilus eugeniae* Kinberg. *Ecological Engineering*, 2008, vol. 32, no. 3, pp. 206-214.

¹²⁷ YADAV, Kunwar D.; TARE Vinod y AHAMMED M. Mansoor. Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling. *Waste Management*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 50-56.

¹²⁸ BUENO. Op. Cit., pp. 1-16.

¹²⁹ EDWARDS C. A & BOHLEN P. J. *Biology and Ecology of Earthworms*. London: Chapman & Hall, 1996. 0412561603.

¹³⁰ LÓPEZ BRAVO, Elvis, *et al.* Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña. *Centro Agrícola*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 49-55.

4. CONCLUSIONES

- La proporción de mezcla conformada por 35,64% RAP, 32,45% EB y 31,91% BC para llevar a cabo los procesos de C, L y C-L, a pesar de presentar una relación C/N inicial de 8,03 que no se ajustaba a los rangos recomendados (25-35), pudo tratarse en cada uno de los tratamientos.
- La mezcla de los tres sustratos se procesó efectivamente para cada uno de los tratamientos. El tratamiento que permitió obtener una mejor calidad del producto fue el lombricompostaje al ser más estable y maduro, además de presentar las mayores concentraciones de N (4,21%), P (4,28%) y K (6,49%), las cuales cumplen con lo exigido por la Norma Técnica Colombiana (NTC 5167).
- Se encontró que hubo estabilidad en los productos de los tres tratamientos, los cuales alcanzaron el mayor nivel de estabilidad, es decir, de degradación de la materia orgánica. Sin embargo, se observa que hubo problemas asociados a la conductividad eléctrica que podrían inhibir el producto en la aplicación agrícola y esto lleva a pensar que es probable que deba reducirse sustratos como los RAP que pueden estar alterando o incidiendo en el contenido de sales. No obstante, al realizar las pruebas de germinación se observa que el tratamiento L y C-L presentaron valores al final del proceso de índices de germinación mayores al 80%.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar la mezcla de sustratos empleada por medio del tratamiento L, así como evaluar los tres tratamientos a mayor escala, con réplicas y considerando análisis fisicoquímicos y microbiológicos adicionales.

BIBLIOGRAFÍA

ADI, A. J. & NOOR, Zalina M. Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, no. 2, pp. 1027-1030.

BANSAL, Sudha & KAPOOR, Krishan. Vermicomposting of crop residues and cattle dung with *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology*, 2000, vol. 73, no. 2, pp. 95-98.

BERTOLDI, M.; VALLINI, G. y PERA A. The Biology of Composting: A Review. *Waste Management & Research*. 1983, vol. 1, no. pp. 157-176.

BHAT, Sartaj Ahmad; SINGH Jaswinder y PAL VIG, Adarsh. Amelioration and degradation of pressmud and bagasse wastes using vermitechnology. *Bioresource Technology*, 2017, vol. 243, pp. 1097-2017.

BHAT, Sartaj Ahmad; SINGH Jaswinder y PAL VIG, Adarsh. Potential utilization of bagasse as feed material for earthworm *Eisenia fetida* and production of vermicompost. *Springerplus*, 2015, vol. 4, no 1, pp. 1-9.

BOHÓRQUEZ, Alexander; PUENTES, Yina J. y MENJIVAR, Juan Carlos. Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica*, 2014, vol. 15, pp. 74.

BRINTON Jr, Willian F, et al. A Standardized Dewar Test For Evaluation Of Compost Self-Heating. *Biocycle Report*, 1992, pp. 1-16.

BUENO MÁRQUEZ, Pedro; DÍAZ BLANCO, Manuel y CABRERA CAPITÁN. Factores que afectan al proceso de compostaje. pp. 1-16.

CACUA BARRETO, Luis Francisco. Producción de abonos orgánicos, aplicando procesos de compostaje y lombricompostaje a residuos de las cadenas agrícolas y pecuarias enfocado al bio-mejoramiento del agro colombiano. Pamplona, 2008. Trabajo de grado (especialidad en transformación de residuos agroindustriales). Facultad de ciencias básicas. Instituto de biocombustibles, energías alternativas y renovables-IBEAR.

CAMPOS POZUELO, Elena, *et al.* Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas, 2004.

CASTILLO, Jean Manuel; ROMERO, Esperanza y NOGALES, Rogelio. Dynamics of microbial communities related to biochemical parameters during vermicomposting and maturation of agroindustrial lignocellulose wastes. *Bioresource Technology*, 2013, vol. 146, pp. 345-354.

CHEN L., *et al.* The Composting Process. 2011, Idaho: Universidad de Idaho, vol. 2, pp. 513-532.

CIFUENTES, Rolando; De León, Roberto y PORRES, Carlos. Producción de abono orgánico a partir de cachaza y tallos de caña de azúcar recuperados de las carreteras. *Revista 23 de la Universidad del Valle de Guatemala*, 2011, pp. 8-17.

CRONJE, A. *et al.* Composting under controlled conditions. *Environmental Technology*. 2003, pp. 1221-1234.

CRUZ SÁNCHEZ, Walter Fernando & GARCÍA CÁRDENAS, Edgar Mauricio. Evaluación del compostaje de residuos de poda y de alimentos crudos y procesados generados en el campus central de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2016. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

CURRY, J. P.; BYRNE, D. y BOYLE K. E. The earthworm of a winter cereal field and its effects on soil and nitrogen turnover. *Boil Fertil Soils*, 1995, vol. 19, no. 2-3, pp. 166-172.

CURY R., Katia, *et al.* Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 2017, vol. 9, pp. 122-132.

DÍAZ, Eduardo. *Guía de lombricultura*. La Rioja, 2002.

DIAZ, L. F, *et al.* *Compost Science and Technology*. Waste Management Series, 2007, vol. 8, pp. 1-364.

DOMINGUEZ, Jorge & EDWARDS, Clive A. Vermicomposting organic waste: A review, *Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century*, 2004, pp. 369-395.

DOMINGUEZ, Jorge & EDWARDS, Clive. Relationships between composting and vermicomposting. *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Waste Environmental Management*, 2011, pp. 11-26.

DULAC, Nadine. *The organic Waste Flow in Integrated Sustainable Waste Management. Tools for Decision-makers. Experiences from the Urban Waste Expertise Programme*, 2001.

EDWARDS C. A & BOHLEN P. J. *Biology and Ecology of Earthworms*. London: Chapman & Hall, 1996. 0412561603.

EDWARDS, Clive A. *Earthworm Ecology*. 2^{da} ed. 2004. ISBN 978-0849318191.

EDWARDS, Clive Arthur & NEUHAUSER, Edward F. Earthworms in waste and environmental management. SPB Academic Publishing, 1988, pp. 391. ISBN 9051030177.

El compost. Física del compost. [En línea]. Disponible: <http://www.miscanteros.com.ar/compost/fisica.htm>. [Acceso: 03-ene-2019].

ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto, *et al.* Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. ISBN:978-958-8504-59-9.

FALLAS CONEJO, Diego. Caracterización del proceso de compostaje y aprovechamiento del calor generado en un reactor bajo aireación forzada. Universidad de Costa Rica. 2016. Trabajo de grado (Ingeniería Agrícola). Escuela de Ingeniería Agrícola.

GARAVITO NANJAS, Jenny Zorayda; MORALES POSADA, Nelly Bibiana y CHÁVEZ PORRAS, Álvaro. Descripción de metodologías del Sistema de lombricultura para gestión de residuos sólidos orgánicos.

GARG V., GUPTA R. Vermicomposting of Agro-Industrial Processing Waste. Springer, 2009. ISBN 978-1-4020-9941-0.

GIL UNDAY, Zuleiqui. Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio de caso "Melanio Hernández". Universidad de Girona. Tesis doctoral, 2005.

Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodología de compostaje y lombricultura.

HERNÁNDEZ GÓMEZ, Angélica María. Evaluación del proceso del compostaje de pollinaza fresca y otros materiales orgánicos generados en el páramo de Berlín. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

INN, Norma chilena de compost 2880-2004 (Nch 2880-2004), Compost – Clasificación y Requisitos, 2004, p. 27.

Instituto nacional de vías (INVIAS). I.N.V.E-104-07. Procedimiento para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.

KIEFER, Andi. The Effects Storage on the Quality of Vermicompost. University of Wisconsin. System solid waste research program. Student Project Report, 2012.

LAZCANO, Cristina; GÓMEZ BRANDÓN, María y DOMÍNGUEZ, Jorge. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. Chemosphere, 2008, vol. 72, pp.1013-1019.

LIM, Su Lim; LEE, Leong Hwee y WU, Ta Yeong. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. Journal of Cleaner Production, 2016, vol. 111, pp. 262-278.

LONDOÑO CAPURRO, Luis Fernando. Aspectos generales del sector azucarero colombiano. 2015-2016. ASOCAÑA (Sector azucarero colombiano).

LÓPEZ BRAVO, Elvis, *et al.* Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña. Centro Agrícola, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 49-55.

LÓPEZ GONZÁLEZ, J. A., *et al.* Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity. *Bioresource Technology*, 2015, vol.175, pp. 406-416.

MANIOS, T. The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. *Environment International*, 2004, vol.29, no. 8, pp. 1079-1089.

MENDOZA, Daicy de Jesús. Vermocompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal. Valencia, 2010. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de producción vegetal.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporación Colombia Internacional – CCI (2006). Oferta Agropecuaria ENA 2006.

MOHEDO GATÓN, Juan José. Estudio de la estabilidad durante el compostaje de residuos municipales. Tesis doctoral Universidad de Córdoba. Facultad de ciencias. Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química.

MONIREH, Majlessi, *et al.* Vermicomposting of food waste: assessing the stability and maturity. *Iranian Journal Environmental Health Science and Engineering*, 2012, vol. 9.

Norma Técnica Colombiana. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003.

On-Farm Composting Methods. [On line]. Available: <http://www.fao.org/docrep/007/y5104e/y5104e05.htm#TopOfPage>. [Accessed:03-ene-2019].

OVIEDO OCAÑA, EDGAR RICARDO, *et al.* Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality. *Waste Biomass Valor*, 2017, pp. 1-12.

OVIEDO OCAÑA, Edgar Ricardo, *et al.* Influencia de la incorporación de pasto estrella como material de soporte (*Cynodon Plectostachyus*) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería y desarrollo*, 2013, vol. 31, no. 2, pp. 251-271.

OVIEDO OCAÑA, Edgar Ricardo, *et al.* Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management*, 2015, vol. 44, pp. 63-71.

OVIEDO OCAÑA, *et al.* Effect of adding bulking materials over the composting process of municipal solid biowastes. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2015, vol. 75, no. 4, pp. 472-480.

PALSANIA, J., *et al.* Effect of moisture content variation over kinetic reaction rate during vermicomposting process. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 49-61.

PANDEY, Ashok, *et al.* Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 2004, vol. 74, no. 1, pp. 1-10.

PANDEY, P. K, *et al.* A new closed loop heating system for composting of green and food wastes. *Journal of Cleaner Production*, 2016, pp. 1252-1259.

PELLEGRINI, Andrea. Capacitación para el reciclado de residuos orgánicos. Universidad Nacional de la Plata. Secretaría de Extensión Universitaria. Ed. 2. 2014. ISBN 978-987-05-4990-1.

PÉREZ LOZADA, Carlos; MANZANO CASTRO, Serafi y SOLIVA TORRENTÓ, Montserrat. Compostaje conjunto de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) y residuos vegetales. Residuos revista técnica, 1999, vol. 9, no. 46.

QIAN, Xiaoyong, *et al.* Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system. Waste Management, 2014, vol. 34, no. 2, pp. 530-535.

RAJ, Dev & ANTIL, R. S. Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. Bioresource Technology, 2012, vol. 58, no 8, pp. 817-832.

RENGIFO, Diego. Lombricultivos del Valle. [En línea]. Disponible: http://www.lombricultivosdeelvalle.blogspot.com/2009_03_01_archive.html. [Acceso:04-ene-2019].

Residuos de EPS para la elaboración de compost. [En línea]. Disponible: <http://anape.es/pdf/ficha42.pdf>. [Acceso: 04-ene-2019]

ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María M. y PANTOJA, Alberto. Manual de compostaje del agricultor. 2013.

RUANO USCATEGUI, Diana & TREJO CASTRO, Álvaro. Evaluación de abono orgánico de residuos agropecuarios en cultivos de *Pisum sativum* y *Solanum phureja*. Revista Agronomía, 2014, vol. 22, no.1., pp. 44-57. ISSN 0568-3076.

SÁNCHEZ MONEDERO, Miguel A., *et al.* Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere*, 2010, vol. 81, no 1, pp. 18-25.

SÁNCHEZ MONEDERO, Miguel, *et al.* Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 2001, vol. 78, no. 3, pp. 301-308.

SEPÚLVEDA VILLADA, Luis Anibal & ALVARADO TORRES, Jhon Alexander. Manual de compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de Sistema de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá, 2013. ISBN 978-958-8512-69-0.

SIM, Edwin & WU, Ta Yeong. The potential reuse of biodegradable municipal solid wastes (MSW) as feedstocks in vermicomposting. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2010, vol. 90, no. 13, pp. 2153-2162.

SING, W. Roshan & KALAMDHAD, Ajay S. Potential for composting of green phumdi biomass of Loktak lake. *Ecological Engineering*, 2014, vol. 67, pp. 119-126.

SOTO PAZ, Jonathan, *et al.* Co-substrate selection to improve biowaste composting by integrating multicriteria methods and cost analysis: A mathematical model applied to Colombia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019.

STENTIFORD, E. & de BERTOLDI, M. Composting process. In: Christensen, T (ed). *Solid Waste Technology Management*, 2010, vol. 1-2.

SUTHAR, Surindra. Bioconversion of post harvest crop residues and cattle shed manure into value-added products using earthworm *Eudrilus eugeniae* Kinberg. *Ecological Engineering*, 2008, vol. 32, no. 3, pp. 206-214.

SUTHAR, Surindra; MUTIYAR, Pravin K y SINGH, Sushma. Vermicomposting of milk processing industry sludge spiked with plant wastes. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 116, pp. 214-219.

TCHOBANOGLIOUS, George & KREITH, Frank. *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill Education, 2002, vol. 13, no. 6. ISBN 978-0071356237.

TIQUIA ARASHIRO, S. Evaluating Phytotoxicity of Pig Manure from the Pig-on-Litter System. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering. The Ohio State University, 1999, pp. 625-647.

TOGNETTI, C.; MAZZARINO, M. J. Y LAOS, F. Cocomposting biosolids and municipal organic waste: Effects of process management on stabilization and quality. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 387-397.

TORRES, Patricia, *et al.* Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*, 2007, vol. 27, no. 1, pp. 267-275.

TOUMELA, M., *et al.* Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 2000, vol 72, no. 2, pp. 169-183.

TRAUTMANN, Nancy M. & KRASNY, Marianne E. *Composting in the classroom*. Scientific Inquiry for High School Students. 1997. ISBN 0-7872-4433-3.

TSENG, David Y., *et al.* Characterization of a Bench-Scale System for Studying the Biodegradation of organic solid wastes. *Biotechnological Prog.* 1995, vol. 11, no. 4, pp. 443-451.

VARNERO, María Teresa; ROJAS, Claudia y ORELLANA, Roberto. Índices de fitotoxicidad de residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 2007, vol. 7, no. 1, pp. 28-37.

WU, Ta Yeong *et al.* Bioit transformation of Biodegradable Solid Wastes into Organic Fertilizers using Composting or/and Vermicomposting. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, vol. 33, pp. 1579-1584. ISSN 2283-9216.

YADAV, Kunwar D.; TARE Vinod y AHAMMED M. Mansoor. Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling. *Waste Management*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 50-56.

ANEXOS

Anexo A. Revisión literaria de compostaje y lombricompostaje de distintos tipos de residuos orgánicos.

Año	Autor	Objetivo	Mezclas Empleadas	Resultados Generales
2014	Bohórquez, A., Puentes Y., Menjivar J. ¹³¹	Evaluar la calidad del compost elaborado con diferentes combinaciones de subproductos del proceso de molienda de la caña de azúcar.	T1: 100% cachaza; T2: 75% cachaza y 25% bagazo; T3: 50% cachaza y 50% bagazo; T4: 25% cachaza y 75% bagazo; T5: 100% bagazo "Todos en 2m ³ de vinaza"	Tiempo de compostaje 90 días para todos los tratamientos; T3: mejor calidad del producto con los mejores contenidos nutricionales; a mayores porcentajes de bagazo, la relación C/N aumentó. Se determinó que la relación C/N final (aproximadamente 20) es fundamental para obtener una buena calidad de compost.
2015	Bhat S., Singh J., Vig A. ¹³²	Estudiar el crecimiento y reproducción de <i>Eisenia foetida</i> con la mezcla de bagazo de caña de azúcar y estiércol de ganado bovino en diferentes proporciones.	B ₀ =100% estiércol, B ₂₅ =25%bagazo y 75%estiercol, B ₅₀ =50% bagazo y 50% estiércol, B ₇₅ =75% bagazo y 25% estiércol, B ₁₀₀ =100% bagazo.	El co-compostaje con estiércol de ganado ayudó a mejorar su aceptabilidad para <i>E. Foetida</i> y mejoró sus características físico-químicas. El mayor tamaño de la población se observó en la proporción B ₅₀ . Nutrientes (N, P, Na) aumentaron desde pre-vermicompost hasta pos-vermicompost, mientras que C/N, pH y metales pesados disminuyeron en todos los productos finales.
2016	García E., Cruz W. ¹³³	Evaluar el compostaje de al menos dos mezclas de residuos de alimentos procesados, no procesados y residuos de poda	TA: 40% alimentos sin procesar y 60% residuos de poda; TB: 50% residuos de poda, 30% residuos de alimentos sin procesar y 20% residuos de alimentos procesados	Tratamientos TA y TB presentaron altos valores de humedad, bajas relaciones C/N, pH neutro y baja conductividad eléctrica; rápidas fases mesofílica y termofílica en TA y TB; TA presentó mayores relaciones C/N; bajo contenido de fósforo y potasio

¹³¹ BOHÓRQUEZ, Alexander; PUENTES, Yina J. y MENJIVAR, Juan Carlos. Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. Corpoica, 2014, vol. 15, pp. 74.

¹³² BHAT, Sartaj Ahmad; SINGH Jaswinder y PAL VIG, Adarsh. Potential utilization of bagasse as feed material for earthworm *Eisenia fetida* and production of vermicompost. Springerplus, 2015, vol. 4, no 1, pp. 1-9.

¹³³ CRUZ. Op. Cit.

2017	Bhat S., Singh J., Vig A. ¹³⁴	Conocer las características de crecimiento de <i>E. foetida</i> mediante la bioconversión de los desechos del prensado de caña (PM) y bagazo (BG) mezclados con estiércol de ganado (CD).	(PM+BG:CD). 0+0:100 (PMBG ₀); 12,5+12,5:75 (PMBG ₂₅); 25+25:50 (PMBG ₅₀); 35+35:30 (PMBG ₇₀); 25+50:25 (PMBG ₇₅).	Las lombrices mostraron el mejor crecimiento y la mayor fecundidad en PMBG ₅₀ (25 + 25:50). K, Na, C, CE y C/N disminuyeron en todas las mezclas finales de bioconversión.
2017	Oviedo E., Dominguez I., Komilis D., Sánchez A. ¹³⁵	Evaluar el efecto de la adición de residuos de alimentos procesados (PFW) y no procesados (UPFW) en el compostaje de residuos verdes (GW)	Tratamiento A: 100% GW; tratamiento B: 40% UPFW + 60% GW; tratamiento C: 50% GW + 30% UPFW + 20% PFW	GW tienen características que limitan su compostaje solo. La incorporación de UPFW y PFW favorece el proceso. Se observó una mejora en la calidad del producto al agregar los residuos, juzgando por la relación C/N y la reducción en el tiempo del proceso. Las mejores condiciones de compostaje se lograron en el tratamiento C (mejor etapa termofílica y temperatura ambiente durante el curado en un tiempo más corto)

¹³⁴ BHAT, Sartaj Ahmad; SINGH Jaswinder y PAL VIG, Adarsh. Amelioration and degradation of pressmud and bagasse wastes using vermitechnology. Bioresource Technology, 2017, vol. 243, pp. 1097-2017.

¹³⁵ OVIEDO. Op. Cit., pp. 1-12

Anexo B. Cálculo de la relación C/N

Para los procesos de C, L y C-L, es necesario conocer las proporciones de los materiales que se van a mezclar teniendo en cuenta parámetros iniciales como humedad y relación C/N.

Propiedades de las materias primas

Material	% humedad	Peso (Kg)	% Carbono	% Nitrógeno
Bagazo ¹³⁶	20,94	30	46,17	0,54
Estiércol ¹³⁷	71,69	30,5	49,33	1,28
Residuos ¹³⁸	71,97	33,5	15,87	3
C/N Inicial	32,10			

Trautmann & Krasny¹³⁹ formulan la siguiente ecuación para el cálculo de la relación C/N inicial:

Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

$$C/N = \frac{W_1(C_1 \times (100 - M_1)) + W_2(C_2 \times (100 - M_2)) + W_3(C_3 \times (100 - M_3))}{W_1(N_1 \times (100 - M_1)) + W_2(N_2 \times (100 - M_2)) + W_3(N_3 \times (100 - M_3))}$$

W_1 = Masa del material n (peso húmedo)

C_n = Carbono (%) del material n

N_n = Nitrógeno (%) del material n

M_n = Contenido de humedad (%) del material n

¹³⁶ SOTO PAZ, Jonathan, *et al.* Co-substrate selection to improve biowaste composting by integrating multicriteria methods and cost analysis: A mathematical model applied to Colombia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019.

¹³⁷ SOTO. *Ibid.*

¹³⁸ OVIEDO. *Op. Cit.*, pp. 1-12.

¹³⁹ TRAUTMANN. *Op. Cit.*

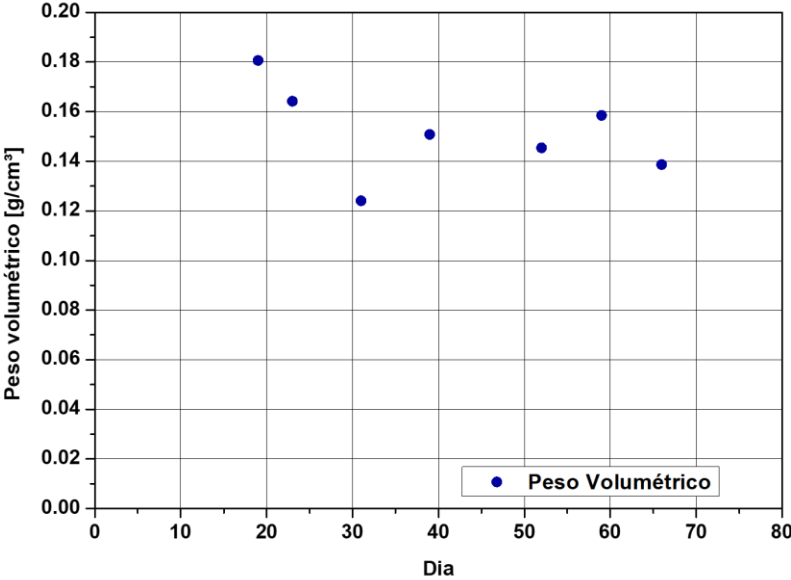
Anexo C. Incrementos de autocalentamiento de Dewar, clasificación y descripción de la estabilidad basada en el sistema europeo.

A continuación, se describe el protocolo detallado empleado para la prueba de estabilidad. El principio del método es registrar con precisión la temperatura más alta alcanzada después de colocar el compost o lombricompost en un recipiente Dewar durante varios días. La interpretación de los resultados se basa en la división en cinco niveles de incrementos de temperatura de 10°C cada uno. Por ejemplo, la clase V se refiere a incrementos de 0-10°C, IV de 10-20°C y el grado I que es el más alto de 40-50°C de calentamiento a temperatura ambiente. Los resultados requieren de 2 a 10 días para ser registrados. Las cinco categorías se clasifican en: grado más bajo (I) compost fresco, dos y tres (II-III) compost activo, cuatro y cinco (IV-V) compost terminado¹⁴⁰.

Rango de temperatura (°C)	Grado de estabilidad	Descripción	Etapas del compost
0-10°	V	Muy estable, compost bien maduro	Compost terminado
10-20°	IV	Moderadamente estable	
20-30°	III	Material en descomposición; compost activo	Compost activo
30-40°	II	Compost inmaduro, joven o muy activo	
40-50° (o más)	I	Compost fresco, crudo	Compost fresco

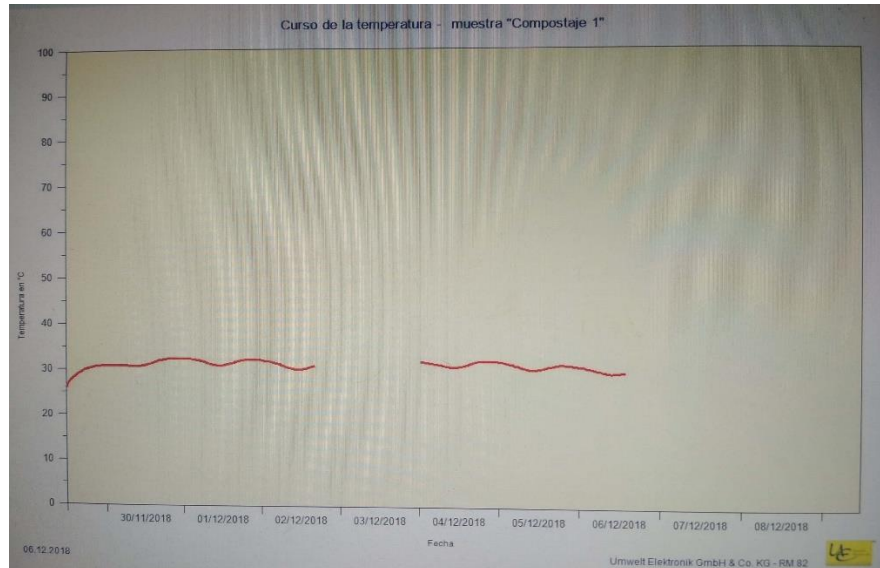
¹⁴⁰ BRINTON. Op. Cit., pp. 1-16.

Anexo D. Comportamiento del peso volumétrico para el tratamiento C.

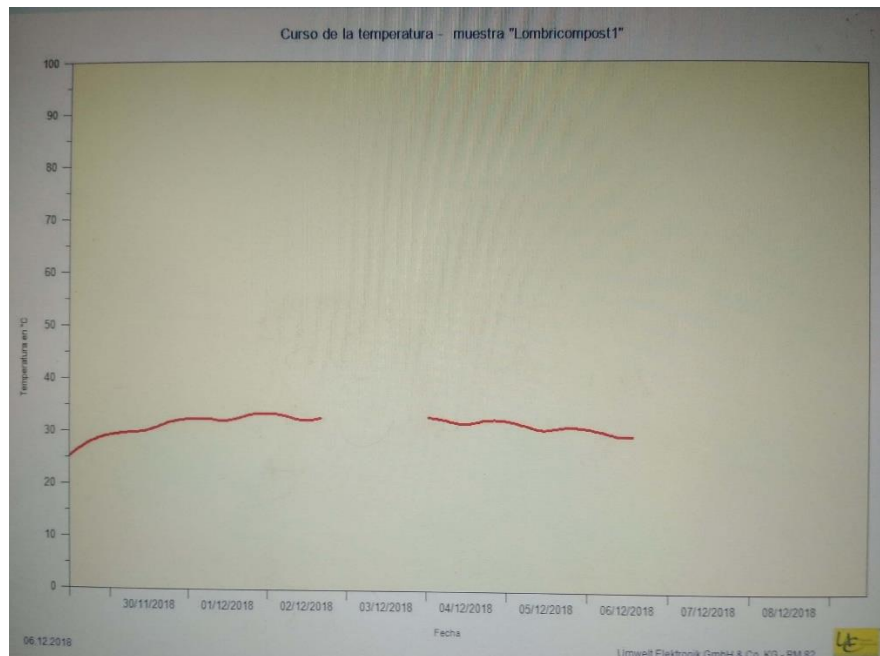


Anexo E. Resultados de la prueba de estabilidad realizadas a los tratamientos C, L y C-L con el equipo RM 82.

Estabilidad tratamiento C



Estabilidad tratamiento L



Estabilidad tratamiento C-L

