

**Evaluación del efecto del compostaje en dos etapas sobre el co-compostaje de residuos
verdes y residuos de alimentos en la Universidad Industrial de Santander**

Anauribeth Portela Rincón

Marcos Fabián Ríos Trillos

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ph.D en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Co-Directora

Angélica María Hernández Gómez

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

A Dios por iluminarme cada día, darme la sabiduría y el conocimiento necesario para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres y hermanos por el amor, cariño y apoyo incondicional que siempre me han brindado, ustedes son el motor que me inspira a seguir cada vez que se presentan momentos difíciles en el camino. Este logro es por y para ustedes.

A mis amigos por cada granito de arena que aportaron para contribuir en mi aprendizaje.
A mis directores de tesis el profesor Edgar Ricardo Oviedo y la Ingeniera Angélica Hernández,
por la ayuda, guía y enseñanza que siempre brindaron en el transcurso de este proyecto.

A mi compañero de tesis Marcos, por la paciencia y compromiso mostrado a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Mil y mil gracias a Todos

Anauribeth Portela

A Dios por darme la sabiduría y fortaleza para culminar con éxito esta etapa de mi vida.

*A mis padres por todo el apoyo que me han dado, por todos los consejos que me ayudaron a ser
un mejor ser humano, este logro también es de ustedes.*

*A todas esas personas buenas que conocí y me brindaron su apoyo durante mi carrera
universitaria.*

*A mi director y co-directora de tesis el profesor Ricardo Oviedo y la ingeniería Angélica
Hernández, por su confianza, ayuda y enseñanzas durante este proceso.*

A mi compañera de tesis Anauribeth Portela por su colaboración, apoyo y paciencia.

Muchas gracias.

Marcos Fabián Ríos Trillos

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Marco de Referencia	19
1.1. Definición de compostaje	19
1.2. Etapas del proceso de compostaje.....	19
1.3 Parámetros del proceso de compostaje	21
1.3.1. Temperatura.	21
1.3.2. Humedad.	22
1.3.3. Aireación.....	22
1.3.4. Relación carbono y nitrógeno.	22
1.4. Compostaje en dos etapas	23
1.5 Roca fosfórica	24
2. Metodología	24
2.1. Configuración del proceso	25
2.1.1. Selección de materiales.....	25
2.1.2 Selección de estrategia operativa.	26
2.1.3 Tratamientos utilizados.....	26
2.2. Montaje y monitoreo del proceso	27
2.2.1. Montaje.	27

2.2.2. Monitoreo.....	28
2.2.3. Pruebas de germinación.	29
2.2.4 Pruebas de estabilidad.....	30
3. Resultados y Discusión	31
3.1 Análisis del proceso	31
3.1.1 Temperatura.	31
3.1.2 Humedad.	33
3.1.3 pH.....	35
3.1.4 Conductividad eléctrica (CE).....	36
3.1.5 Aireación.....	37
3.1.6 Peso volumétrico.....	39
3.1.7 Sólidos volátiles.	40
3.2 Pruebas de madurez	42
3.2.1 Germinación.....	42
3.2.2 Estabilidad.....	42
4. Dimensionamiento de la planta compostaje	44
4.1 Ubicación	44
4.2 Etapas/Procedimiento	44
4.2.1 Recepción y almacenamiento.	44
4.2.2 Separación y selección del material a compostar.	45
4.2.3 Trituración y mezcla del material a compostar.....	45
4.2.4 Etapa de descomposición.....	45
4.2.5 Etapa de maduración.....	46

4.2.6 Tamizaje y almacenamiento del producto final.	46
4.2.7 Distribución/Transporte.	46
4.2 Herramientas necesarias durante el proceso	47
4.3 Mano de obra requerida	48
5. Conclusiones	50
Referencias Bibliográficas	52
Apéndices.....	57

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Fases del proceso de compostaje. Adaptada de Sepúlveda & Alvarado (2013).....	21
<i>Figura 2.</i> Comportamiento de la temperatura del compostaje en 2 etapas. Adaptada de Zhang & Sun (2014).....	23
<i>Figura 3.</i> Aireación Pasiva	26
<i>Figura 4.</i> Comportamiento promedio de la temperatura en los tratamientos TA y TB.....	33
<i>Figura 5.</i> Comportamiento de la humedad en el tratamiento TA.....	34
<i>Figura 6.</i> Comportamiento de la humedad en el tratamiento TB	35
<i>Figura 7.</i> Comportamiento del pH en el tratamiento TA	36
<i>Figura 8.</i> Comportamiento del pH en el tratamiento TB.....	36
<i>Figura 9.</i> Comportamiento de la CE en el tratamiento TA	37
<i>Figura 10.</i> Comportamiento de la CE en el tratamiento TB.....	37
<i>Figura 11.</i> Comportamiento de CO y volteos en el tratamiento TA	38
<i>Figura 12.</i> Comportamiento de la CO y volteos en el tratamiento TB.....	39
<i>Figura 13.</i> Comportamiento del PV en el tratamiento	40
<i>Figura 14.</i> Comportamiento del PV en el tratamiento TB	40
<i>Figura 15.</i> Comportamiento de los SV en el tratamiento TA.....	41
<i>Figura 16.</i> Comportamiento de los SV en el tratamiento TB.....	41
<i>Figura 17.</i> Resultados Índice de germinación	42

<i>Figura 18.</i> Resultado prueba de estabilidad	43
<i>Figura 19.</i> Ubicación planta compostaje	44
<i>Figura 20.</i> Diagrama del proceso de la planta de compostaje	47
<i>Figura 21.</i> Dimensionamiento planta de compostaje	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Tratamientos utilizados</i>	27
Tabla 2. <i>Resumen del comportamiento de la temperatura en los dos tratamientos</i>	32
Tabla 3. <i>Resumen de humedad y adición de agua</i>	34
Tabla 4. <i>Valores recomendados parámetros del proceso de compostaje</i>	45
Tabla 5. <i>Requerimientos de personal</i>	49

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Investigaciones con adición de roca fosfórica en el compostaje	57
Apéndice B. Procedimiento para calcular la relación C/N teórica	58
Apéndice C. Valores de referencia de las propiedades fisicoquímicas	59
Apéndice D. Caracterización de los Residuos Verdes.....	60
Apéndice E. Muestreo y equipos utilizados.....	61
Apéndice F. Comportamiento de la temperatura de las réplicas en los tratamientos TA y TB....	67
Apéndice G. Resultados de prueba de estabilidad realizada con el equipo RM 82.....	69
Apéndice H. Ubicación Detallada Planta de compostaje UIS	73
Apéndice I. Dimensionamiento planta de compostaje.....	75
Apéndice J. Resultados de laboratorio.....	77

Resumen

Título: Evaluación del efecto del compostaje en dos etapas sobre el co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos en la Universidad Industrial de Santander *.

Autores: Anauribeth Portela Rincón
Marcos Fabián Ríos Trillos**

Palabras Claves: Compostaje, residuos verdes, aireación pasiva, residuos de alimentos

Descripción:

El compostaje es una alternativa económica y viable para el aprovechamiento de Residuos Verdes (RV) dado que reduce su volumen y a su vez ofrece un producto que mejora las propiedades físicas del suelo. La dificultad que se tiene con este tipo de residuos es el alto contenido de material lignocelulósico lo que conlleva a un proceso de degradación muy lenta. En esta investigación se plantea el uso de las siguientes estrategias con el objetivo de optimizar el proceso de compostaje de RV: i) trituración previa del material, ii) adición de diferentes materiales de enmienda, iii) compostaje en dos etapas con sistema de aireación pasiva. Para ello, se realizaron dos tratamientos variando la configuración operacional (i.e. TA-compostaje en dos etapas y TB-compostaje tradicional), los cuales estuvieron compuestos por la misma mezcla (48% RV, 20% residuos de alimentos no procesados, 19% residuos de alimentos procesados, 13% de aserrín) y adición de roca fosfórica equivalente al 4% del peso total de la pila. En el proceso de compostaje realizado se obtuvo como resultado un producto estable, con índices de germinación mayores al 80%. En cuanto al sistema de confinamiento usado en el TA no se registró una reducción en el tiempo del proceso de compostaje, por lo que el TB es la mejor opción ya que obtuvo mayor degradación en la fase termofílica y su implementación es sencilla.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Edgar Ricardo Oviedo Ocaña Ph.D en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Co-Directora Angélica María Hernández Gómez Ingeniera Civil

Abstract

Title: Evaluation of the effect of composting in two stages on the co-composting of green waste and food waste at the Industrial University of Santander *.

Authors: Anauribeth Portela Rincón
Marcos Fabián Ríos Trillos **

Keywords: Composting, green waste, passive aeration, food waste

Description:

Composting is an economical and viable alternative for the treatment of Green Waste (GW) since it reduces its volume at the same time that provides a product that improves the physical properties of the soil. The difficulty with this type of waste is its high content of lignocellulosic material which leads to a very slow degradation process. This research aims at presenting the following strategies in order to optimize the GW composting process: i) prior waste shredding, ii) addition of organic amendment, iii) two-stage composting with passive aeration system. To carry it out, two treatments were performed using different operational configuration (i.e. TA: two-stage composting and TB: traditional composting), which were composed of the same mixture (48% GW, 20% unprocessed food waste, 19% processed food waste, 13% sawdust) and phosphoric rock equivalent to 4% of the total weight of the pile. As a result of the composting process, a stable product was obtained which had germination rates higher than 80%. On the other hand, as for the confinement system used in the TA, there was no reduction in the composting process time; therefore, the TB is the best option due to the fact that it obtained greater degradation in the thermophilic phase and its implementation is simple.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Edgar Ricardo Oviedo Ocaña Ph.D en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Co-Directora Angélica María Hernández Gómez Ingeniera Civil

Introducción

El informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en la revisión del 2017 sobre las perspectivas de crecimiento de la población humana, señala que esta alcanzará los 8,600 millones para el año 2030, 9,800 millones para 2050 y 11,200 para 2100 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2017). Este crecimiento traerá como consecuencia el incremento del consumo de los recursos naturales y la contaminación asociadas a las actividades humanas como, por ejemplo, la generación de Residuos Sólidos Municipales (RSM) (Ballén Buitrago, Mateus Montañez, Mora León, & Salazar Cáceres, 2017).

Los RSM se han convertido en un desafío debido a su falta de aprovechamiento (López Macías, 2002), estos materiales pueden ser transformados con el objetivo de volver a incorporarlos en el ciclo económico con fines de comercio contribuyendo a la minimización de las basuras y el impacto de éstos (Ballén Buitrago et al., 2017). Dentro de la composición de los RSM se encuentra una proporción considerable de residuos verdes (RV) generados por tala de árboles, poda de arbustos, hojas y hojarasca (Oviedo-Ocaña, Dominguez, Komilis, & Sánchez, 2019). En Taiwán, los RV constituyen entre el 22 y el 30% de los RSM (Kumar, Ou, & Lin, 2010), mientras que, en Estados Unidos, representan un 13% de los RSM (Levis, Barlaz, Themelis, & Ulloa, 2010).

Una alternativa para aprovechar los RV es el compostaje. Este proceso reduce considerablemente su volumen ofreciendo un producto que puede mejorar las propiedades físicas del suelo, como la disminución de la densidad aparente y la retención de agua (Zoes, Dinel, Paré, & Jaouich, 2001). A partir del año 2000, los estudios sobre compostaje de RV han aumentado

considerablemente, en Asia y Europa el porcentaje de estos estudios corresponden al 40% y 36% respectivamente. Sin embargo, en Latinoamérica aún son escasos, como es el caso de Colombia, donde el porcentaje de publicaciones es del 2% (Reyes Torres, Oviedo Ocaña, Dominguez, Komilis, & Sánchez, 2018).

La principal dificultad en el compostaje de RV se debe a que esta clase de residuos tiene un alto contenido de material lignocelulósico, el cual se compone principalmente de una mezcla de celulosa, hemicelulosa y lignina, por lo que la degradación de estos residuos es muy lenta y compleja (Argyropoulos & Menachem, 1997).

Diversas estrategias para mejorar este proceso han sido reportadas; una de las que se han propuesto recientemente, considera prolongar la fase termofílica en el proceso de compostaje, alcanzando la máxima temperatura dos veces, este proceso se conoce como compostaje en dos etapas. Adicional a esto, la adición de azúcar morena y superfosfato de calcio en pequeñas cantidades, ayuda a obtener un material estable en menor tiempo y, por ende, podría tener un efecto positivo en los costos operativos, respecto al compostaje tradicional (Zhang, Sun, Tian, & Gong, 2013).

La producción de RV en la Universidad Industrial de Santander (UIS) es de aproximadamente 732.5 kg diarios, de los cuales el 74% pueden ser aprovechados en procesos de compostaje (Barragan Gordillo & Gomez Cossio, 2018). Por lo tanto, Calderon & Medina (2018) realizaron un primer acercamiento a la implementación del compostaje en dos etapas como una mejora operativa para la optimización del compostaje de RV en la UIS y definieron una mezcla de RV con Residuos de Alimentos Procesados (RAP), Residuos de Alimentos No Procesados (RANP), Aserrín (AS) y Roca Fosfórica (RF). En su experimentación se pudo evidenciar mejoras en cuanto a la calidad del producto, no obstante, no fue posible notar el comportamiento en dos etapas

probablemente por escasez de oxígeno en el material confinado. En consecuencia, este proyecto busca implementar el sistema de compostaje en dos etapas con la combinación de aireación pasiva y activa (suministrada mediante volteos) como estrategia para mejorar y acelerar el proceso de compostaje de estos residuos y obtener un producto final que tenga potencial de ser aplicado en las zonas verdes del campus. Adicionalmente con los resultados obtenidos, la UIS podría considerar la implementación y puesta en marcha de una planta de compostaje con sus respectivos requerimientos técnicos, minimizando el volumen que genera esta clase de residuos que terminan en los sitios de disposición final del municipio. A su vez, la UIS busca incentivar el empleo de estrategias que ayuden a mitigar el daño ambiental que pueden llegar a causar los desechos que generan las actividades humanas.

Por lo tanto, el presente trabajo realiza una evaluación sobre el efecto del compostaje en dos etapas sobre el co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos como estrategia para el aprovechamiento de éstos recursos en la UIS. Para ello, se analizarán las condiciones del proceso de co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos; a lo largo del proceso se determinará la madurez y estabilidad de los productos obtenidos al finalizar el proceso y con los resultados obtenidos, se identificarán los requerimientos técnicos para la realización de una planta de co-compostaje en el campus central de la UIS.

1. Marco de Referencia

1.1. Definición de compostaje

El compostaje es un tratamiento para la transformación de los residuos orgánicos, basándose en la degradación de la materia orgánica. El resultado de este proceso recibe el nombre de compost y es utilizado para el mejoramiento de los suelos (López Macías, 2002). Esta técnica, además de ser amigable con el medio ambiente se considera de bajo costo y puede traer ventajas económicas como la venta o uso del producto y ecológicas como el reemplazo de fertilizadores artificiales, producción de menos aguas lixiviadas y gases contaminantes (Röben, 2002).

1.2. Etapas del proceso de compostaje

Durante el proceso de compostaje se presentan cuatro fases, una primera fase es llamada fase mesofílica, que comienza a temperatura ambiente, aumentado hasta 40°C, gracias a la actividad microbiana donde los microorganismos utilizan las fuentes disponibles de carbono y nitrógeno para generar calor. En esta fase se comienza la degradación de azúcares por lo que se producen ácidos orgánicos por ende el pH disminuye. Esta fase tiene una duración entre 2 a 5 días (Román, Martinez, & Alberto, 2013). La segunda fase es la fase termofílica, en la cual los microorganismos transforman el nitrógeno en amoníaco, haciendo que el pH aumente hasta volverse alcalino. Los compuestos lignocelulósicos y ceras se degradan y parcialmente se transforman en humus (López

Macías, 2002). La temperatura en esta fase está comprendida entre los 45 y 70°C. Al alcanzar temperaturas por encima a los 60°C el calor generado destruye bacterias de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp*, a su vez se eliminan las esporas de hongos fitopatógenos. Esta etapa puede durar entre una semana y varios meses, dependiendo de la naturaleza de la materia orgánica, las condiciones climáticas y del lugar (Román et al., 2013).

La temperatura en la fase de enfriamiento se encuentra por debajo de los 45°C. Este comportamiento sucede debido a que las fuentes de carbono y nitrógeno son escasas, contribuyendo a que los hongos termófilos aparezcan nuevamente y logren descomponer compuestos como la celulosa. El pH desciende manteniéndose ligeramente alcalino. La duración de esta fase es de 2 a 5 semanas (Sepúlveda & Alvarado, 2013).

Finalmente, la fase de maduración inicia a temperatura ambiente formando ácidos húmicos y fúlvicos (Román et al., 2013). Esta fase es un periodo de fermentación lenta en la cual la temperatura va disminuyendo. Los organismos presentes son invertebrados los cuales terminan el proceso de descomposición dando como resultado un compost maduro, con textura granular, color oscuro y olor a tierra. Este proceso puede tener una duración de 3 a 6 meses (Salinas, León, Pérez, & Yagello, 2018).

En la Figura 1 se presentan las diferentes fases del proceso de compostaje y el comportamiento de la temperatura y pH durante la transformación de la materia orgánica en condiciones aeróbicas a lo largo del tiempo.

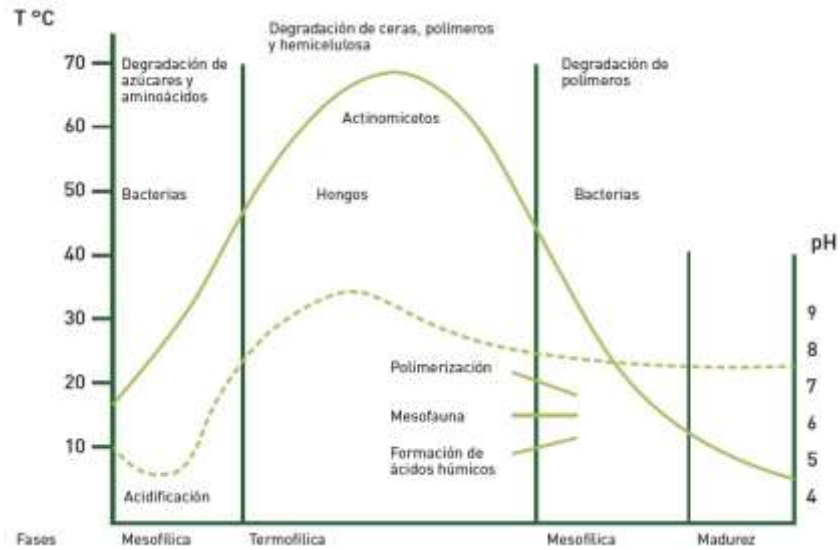


Figura 1. Fases del proceso de compostaje. Adaptada de Sepúlveda & Alvarado (2013).

1.3 Parámetros del proceso de compostaje

1.3.1. Temperatura. Durante el proceso de compostaje, el incremento de la temperatura es un síntoma claro de que la actividad microbiana ha comenzado dando paso a la mineralización y crecimiento de las poblaciones microbianas que a su vez son las encargadas de la descomposición de la materia orgánica, por esto la temperatura ha sido considerada como una variable fundamental en el control del compostaje existiendo una relación directa entre la temperatura y la magnitud de la degradación de la materia orgánica (Liang, Das, & McClendon, 2003). Aunque existen controversias entre diferentes autores sobre la temperatura para el desarrollo de un compostaje óptimo, el rango más común varía entre los 50 y 60°C (Sepúlveda & Alvarado, 2013) ya que si esta sobrepasa los 70°C inhibe el crecimiento de los microorganismos dando paso al fenómeno conocido como suicidio microbiano (Bueno, Díaz, & Cabrera, 2012).

1.3.2. Humedad. Así como la temperatura, la humedad está vinculada a los microorganismos, ya que el agua es usada como medio de transporte de nutrientes; para garantizar que el proceso de compostaje sea aeróbico se recomiendan humedades entre el 45 y 60% (Román et al., 2013). Al tener una humedad elevada, esta desplazaría al oxígeno y como consecuencia, el proceso pasaría a ser anaeróbico. Por otra parte, al tener humedades bajas, se produce una disminución de actividad microbiana y por consiguiente el proceso se retrasa (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

1.3.3. Aireación. Para que el compostaje se desarrolle de manera aeróbica se debe garantizar la presencia de oxígeno para evitar los malos olores y asegurar la evolución del proceso por medio de la descomposición aeróbica para eso la concentración de oxígeno debe ser mayor al 10%, mientras que si estas son menores al 5%, el proceso sería de manera anaeróbica (Sepúlveda & Alvarado, 2013). Existen sistemas de aireación pasivos o forzados que pueden mantener un nivel de oxígeno adecuado (Varma, Prasad, Deb, & Kalamdhad, 2018).

1.3.4. Relación carbono y nitrógeno. El carbono cumple dos funciones, es una fuente de energía para los microorganismos y conforma aproximadamente el 50% de la masa de las células microbianas. Por otro lado, el nitrógeno es un componente decisivo de las proteínas y aminoácidos lo cual es importante para el crecimiento celular, de modo, si el nitrógeno es escaso el proceso de degradación será lento (Tuomela, Vikman, Hatakka, & It, 2000).

La relación C/N es un factor que influye en la velocidad del proceso, si la C/N es mayor a 40, la actividad microbiana disminuye lo que lleva ralentizar el proceso puesto que los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono. Si la relación C/N es muy baja, es decir,

exceso en nitrógeno, el proceso es más rápido, pero evita que la materia orgánica se degrade totalmente emitiendo amoníaco al medio ambiente. La relación C/N ideal oscila entre 25:1 y 30:1, es decir, por cada 25 a 30 partes de carbono una parte de nitrógeno (Bueno et al., 2012).

1.4. Compostaje en dos etapas

Investigaciones realizadas con el objetivo de reducir el tiempo en el proceso de compostaje, describen un método el cual consiste en obtener dos fermentaciones en la fase termofílica, con la finalidad de que la temperatura máxima se alcance dos veces y por consiguiente haya una mayor actividad microbiana, obteniendo un compost maduro y estable en 30 días en lugar de los 90-270 días que generalmente se requieren para el compost tradicional (Zhang et al., 2013).

En la Figura 2 se presenta el comportamiento de la temperatura durante el proceso de compostaje en dos etapas.

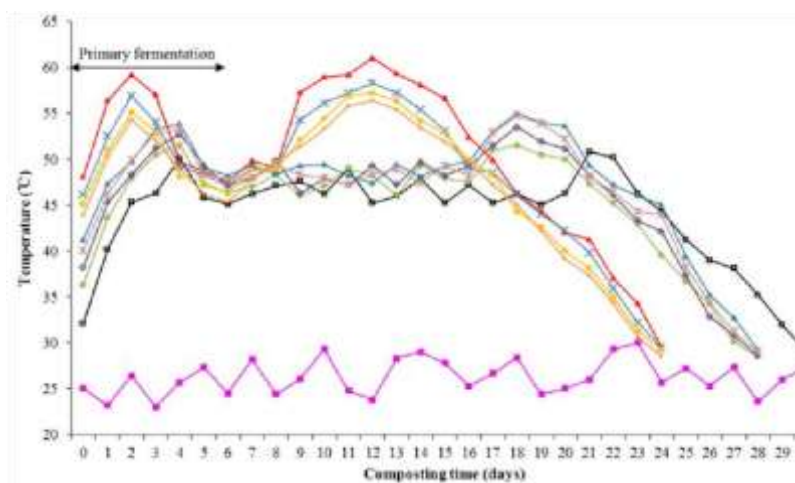


Figura 2. Comportamiento de la temperatura del compostaje en 2 etapas. Adaptada de Zhang & Sun (2014).

1.5 Roca fosfórica

El uso de la Roca Fosfórica (RF) como fuente natural de fósforo contribuye a la intensificación agrícola sostenible ya que el fósforo es un elemento nutritivo esencial para las plantas y animales (FAO, 2007) . La adición de RF en el compostaje ayuda acelerar el proceso dado que estimula los microorganismos que atacan la celulosa y a su vez estimula las bacterias fijadoras de nitrógeno (Dalzell, Biddelstone, Gray, & Thuraniranjana, 1987). En investigaciones previas (AnexoA), autores como Bustamante et al. (2016) y Naher, Sarkar, Jahan, & Biswas (2018) han usado RF en procesos de compostaje, en los cuales el compost obtenido mostró mejora en la disponibilidad de fósforo, obteniendo mayor contenido de nutrientes y favoreciendo la fertilidad del suelo, lo que significa que la aplicación de la RF en procesos de compostaje podría reducir la utilización de fertilizantes químicos.

2. Metodología

Las estrategias implementadas para el caso de estudio fueron: i) trituración previa del material, ii) adición de diferentes materiales de enmienda, iii) compostaje en dos etapas con sistema de aireación pasiva. Estas estrategias fueron seleccionadas luego de analizar la investigación realizada por Reyes Torres et al. (2018) en su estudio sobre estrategias para optimizar el compostaje de RV, donde recomienda implementar más de dos metodologías para reducir el tiempo del proceso de compostaje sin afectar la calidad del compost final (Reyes Torres et al.,

2018). El estudio se llevó a cabo en una zona experimental ubicada en la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia, mediante el montaje de pruebas piloto, en donde se analizaron algunas estrategias operativas, seleccionadas con el fin de optimizar el tiempo y calidad del proceso de compostaje de residuos verdes.

2.1. Configuración del proceso

2.1.1. Selección de materiales. Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos publicados en bases de datos como Scopus®, Sciencedirect®, Springer® y Scielo® con el objetivo de encontrar qué materiales se pueden adicionar para mejorar la calidad del proceso de compostaje con RV. Además, se analizaron casos sobre compostaje de RV realizados en la UIS en años anteriores con la finalidad de observar los resultados obtenidos y poder determinar estrategias que ayuden a mejorar el proceso. Por ejemplo, Gaitán & Hernández (2014) evaluaron la calidad fisicoquímica de los residuos orgánicos generados en el campus universitario determinando su potencial uso como materia prima en procesos de compostaje; Foreroa & Pachón (2015) evaluaron la mezcla de residuos de alimentos procesados (RAP) y residuos de alimentos no procesados (RANP) y los RV, con la finalidad de optimizar el proceso de compostaje; y Calderon & Medina (2018) implementaron el compostaje en dos etapas junto con la adición de roca fosfórica y aserrín. El material de enmienda utilizado fue obtenido en el campus universitario. Por otra parte, se determinó que la adición de aserrín era necesaria, ya que este material aporta carbono, así como la adición de roca fosfórica que contribuye al aumento de calcio en los suelos (Van den Berghe, Kakana, Sota, & Rwigema, 1993).

2.1.2 Selección de estrategia operativa. En investigaciones anteriores se encontró un método para mejorar el proceso de compostaje que busca obtener mejor degradación de la lignocelulosa que el compostaje tradicional. Este método incluye una fermentación primaria y una fermentación secundaria, por medio de un sistema de confinamiento (Zhang et al., 2013). Para el presente estudio se utilizaron tres cajones de dimensión de 1.3 m de largo, 0.55 m de ancho y 1.25 m de alto con el objetivo de obtener las dos etapas (Calderon & Medina, 2018), a su vez para garantizar la aireación se utilizó un sistema de aireación pasiva que consiste en colocar 4 tubos PVC de 1.3 m de altura con un diámetro de 7 cm, al cual se le realizaron perforaciones de 2.5 cm de diámetro cada 20cm de distancia (Varma et al., 2018) (Ver Figura 3).



Figura 3. Aireación Pasiva

2.1.3 Tratamientos utilizados. Después de evaluar la disponibilidad de cada uno de los materiales, se ajustó de manera teórica la relación C/N (Trautmann & Krasny, 2012), lo cual arrojó un valor de 19.84 (Ver procedimiento y valores de referencia de las propiedades fisicoquímicas en el Anexo B y en Anexo C).

Se realizaron dos tratamientos: i. Tratamiento A (TA) y ii. Tratamiento (TB); los cuales estuvieron compuestos por la misma mezcla, con tres réplicas cada uno. Cada tratamiento tuvo una configuración operacional diferente. En la Tabla 1 se muestran los tratamientos realizados.

Tabla 1.

Tratamientos utilizados

Tratamiento	Configuración operacional	Descripción
TA	Dos etapas	48% RV + 20% RANP + 19% RAP + 13% AS + 4% RF
TB	Tradicional	48% RV + 20% RANP + 19% RAP + 13% AS + 4% RF

Nota 1: Residuos Verdes (RV), Residuos de alimentos no procesados (RANP), Residuos de alimentos procesados (RAP), Aserrín (AS), Roca fosfórica (RF). Nota2: El porcentaje de roca fosfórica es adicional respecto al peso de cada pila (200kg).

Los porcentajes utilizados para la mezcla fue el resultado obtenido luego de ajustar la relación carbono y nitrógeno. Para determinar el porcentaje de adición de RF se revisaron varios artículos (Anexo A), en los cuales la RF fue adicionada en diferentes porcentajes. Evaluando los resultados obtenidos, se determinó la adición de 4% de RF con respecto al peso de cada pila, es decir 8 kg de RF en cada unidad experimental.

2.2. Montaje y monitoreo del proceso

2.2.1. Montaje. Para el montaje en la zona experimental de la UIS, se inició con la recolección de los RANP y RAP que son obtenidos de la sección de comedores de la UIS y fruterías cercanas al campus universitario. Los RV se recolectaron del mantenimiento de las zonas verdes de la universidad. El AS y la RF fueron adquiridos por proveedores externos a la UIS. La recolección fue realizada cuatro días antes del montaje, el cual fue realizado el viernes 6 de abril del 2019.

Inicialmente, se realizó el pesaje de todo el material. La caracterización física de los RV se realizó por medio del cuarteo, que consiste en formar una pila de forma cónica y dividirla en 4 partes iguales, luego se mezclan dos partes opuestas y se vuelve hacer el mismo procedimiento hasta llegar a obtener una muestra de 5 kg de RV (Anexo D).

Luego se procede mezclar y triturar manualmente todos los residuos. Después se realiza el montaje las pilas de forma cónica para el caso del TB, las cuales quedaron con una altura aproximada de 0.8 m y para el TA se procede a colocar los tubos y llenar los cajones quedando de una altura aproximada de 0.90 m.

2.2.2. Monitoreo. En el monitoreo se hizo seguimiento de la temperatura, que fue tomada en diferentes puntos (Anexo E), usando el termómetro digital K-Type HI935005N de alta precisión ($\pm 0,2\%$). El monitoreo se realizó de la siguiente manera: los primeros 21 días del proceso la temperatura se tomó dos veces al día; una en horas de la mañana y la otra en horas de la tarde. A partir del día 22 se tomó una vez al día en horas de la mañana. El pH y la CE se analizaron utilizando una solución de 10 gramos de muestra en 100 ml de agua destilada, con el equipo pHmetro sensION™ + MM374; estas mediciones fueron realizadas tres veces por semana hasta el día 42, después se optó por una frecuencia de dos veces por semana ya que el comportamiento no variaba significativamente con respecto a la medición tomada los días anteriores. Para determinar el contenido de humedad, se usaron 50 gramos de muestra secados a 105°C por 24 horas en una mufla MFR-2015; este parámetro fue medido con una frecuencia de tres veces por semana hasta el día 42, y posteriormente dos veces por semana. Según los resultados de este parámetro se determinaba la necesidad de realizar humectaciones. Los sólidos volátiles fueron analizados siguiendo el procedimiento descrito en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, que consiste en

tomar 5 gramos de la muestra seca a 550°C por cuatro horas (ICONTEC, 2004), los sólidos volátiles se tomaron el primer día del proceso y a partir del día 24 se monitoreó dos veces por semana. Para proporcionar el oxígeno necesario a las pilas y para que la temperatura no excediera los 70°C, se hizo volteo manual diario hasta el día nueve, posteriormente cada dos días hasta el día 25, luego cada tres días hasta el día 37 y finalmente una vez por semana. En cada volteo se determinaba el peso volumétrico. Para medir la concentración de oxígeno (CO) se utilizó una sonda CM37, con una frecuencia de dos veces por semana hasta el día 40 y luego una vez a la semana.

2.2.3. Pruebas de germinación. Un factor importante para determinar la madurez del compost es conocer las propiedades fitotóxicas del compost, la técnica más empleada es el test de Zucconi o índice de germinación. Con esta prueba se puede determinar los niveles de fitotoxicidad que de ser muy altos pueden tener efectos negativos en las plantas, e incluso inhibir la germinación de las semillas (Varnero, Rojas, & Orellana, 2007).

Para esta prueba se utilizaron en total 21 cajas Petri, tres para cada pila y tres testigos los cuales contenían agua destilada. Para las muestras sacadas de las pilas se preparó una solución 10 gramos de muestra en 100 ml de agua destilada, se dejó reposar por tres horas y luego se filtró. A cada caja Petri se le agregaron 10 ml de solución, las cuales contenían 10 semillas de rabanito (*Raphanus sativus*) sobre papel filtro. Finalmente se dejaron reposar en la oscuridad, a una temperatura de 25°C aproximadamente, por 72 horas. Se proceden a contar las semillas germinadas para cada caja Petri y se miden la longitud de las radículas. Este procedimiento se realiza tanto en los extractos como en los testigos y después de tener todos estos datos se procede a hallar el índice de germinación para cada extracto.

Germinación relativa (GR)

$$GR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en extracto}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en testigo}} \times 100 \quad (1)$$

Largo de radícula relativo (ER)

$$ER = \frac{\text{Largo promedio de radículas en el extracto (cm)}}{\text{Largo promedio de radículas en testigo (cm)}} \times 100 \quad (2)$$

Índice de germinación (IG)

$$IG = \frac{GR \times ER}{100} \quad (3)$$

La norma chilena de compost NCh2880 establece usar semillas de rabanito (*Raphanus sativus*) para esta clase de bioensayos y califica como compost maduro si este tiene un porcentaje de germinación mayor o igual al 80%. En Colombia, no hay normativa que sugiera el procedimiento a seguir para pruebas de germinación.

2.2.4 Pruebas de estabilidad. Esta prueba se hace con el equipo de medición RM 82 junto con los vasos Dewar. El principio de esta prueba es registrar el aumento de la temperatura durante varios días, dividiendo en cinco niveles de 10°C cada uno, para ello se llenan los vasos Dewar con muestra húmeda, a partir de ese instante el programa comienza a monitorear las variaciones de temperatura que va presentando la muestra, registrándolas en una gráfica, si la temperatura no presenta incrementos mayores a 10°C desde el inicio de la prueba y se mantiene estable durante 2 o 3 días, el compost estaría estable.

Esta prueba se realiza con el objetivo de obtener el grado de estabilidad del compost. Los niveles V y IV se denominan compost estabilizado, los niveles III y II se denominan compost activo y el nivel I se denomina compost fresco (Brinton, Evans, Droffner, & Brinton, 1992).

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis del proceso

3.1.1 Temperatura. En la Gráfica 1 se muestra el comportamiento promedio de la temperatura en los tratamientos TA y TB, se puede observar que el tratamiento TB muestra temperaturas más altas hasta el día 34, por consiguiente, ocurre mayor degradación de la materia orgánica. La fase mesofílica ($<45^{\circ}\text{C}$) tuvo una duración de un día en todos los tratamientos. La Tabla 2 muestra un resumen del comportamiento de la temperatura donde se evidencia el tiempo para alcanzar la temperatura máxima, la duración de la fase termofílica y el tiempo que se tardó en alcanzar la temperatura ambiente. A su vez se muestran los valores de pH inicial y la totalidad de agua adicionada durante el proceso.

En los TA la temperatura máxima fue de 62.9°C , 64.4°C y 62.7°C para las pilas TA1, TA2 y TA3 respectivamente alcanzada entre los días 3 y 5. En el día 10 se retiraron los cajones de confinamiento dando paso al proceso tradicional, lo cual permitió evidenciar el comportamiento de dos etapas obteniendo otro pico de temperatura de 62.6°C , 62.9°C y 61.9°C para las pilas TA1, TA2 y TA3 respectivamente. La fase termofílica ($>45^{\circ}\text{C}$) tuvo una duración de 32 días para las pilas TA1 y TA2, y para la pila TA3 de 28 días. En los tratamientos TB la temperatura máxima fue de 71.2°C en el día 5, 71.4°C en el día 11 y 67.9°C en el día 12 para las pilas TB1, TB2 y TB3 respectivamente. Los días del 6 al 8 se puede ver que la temperatura disminuyó debido a un exceso de humedad. La fase termofílica tuvo una duración de 35 días para todas las pilas. Las

temperaturas máximas registradas en todas las pilas fueron mayores a 60°C con una duración mayor o igual a cuatro días (Oviedo-Ocaña et al., 2019). Según Román et al. (Román et al., 2013), se podría decir que el proceso obtuvo una desinfección eliminando los agentes patógenos como *Escherichia coli* y *Salmonella* spp.

El comportamiento de la temperatura para cada una de las réplicas de los tratamientos TA y TB se encuentran disponibles en el Anexo F.

Tabla 2.

Resumen del comportamiento de la temperatura en los dos tratamientos

Pila	pH inicial	Tiempo inició fase termofílica (días)	Temperatura máxima (°C)	Tiempo para obtener la temperatura máxima (días)	Duración de la fase termofílica (días)	Tiempo para alcanzar T(Amb) + 3°C (días)
TA1	6.08	1	62.9	4	32	64
TA2	6.08	1	64.4	3	32	65
TA3	6.08	1	62.7	5	28	64
TB1	6.08	1	71.2	5	35	64
TB2	6.08	1	71.4	11	35	64
TB3	6.08	1	67.9	12	35	64

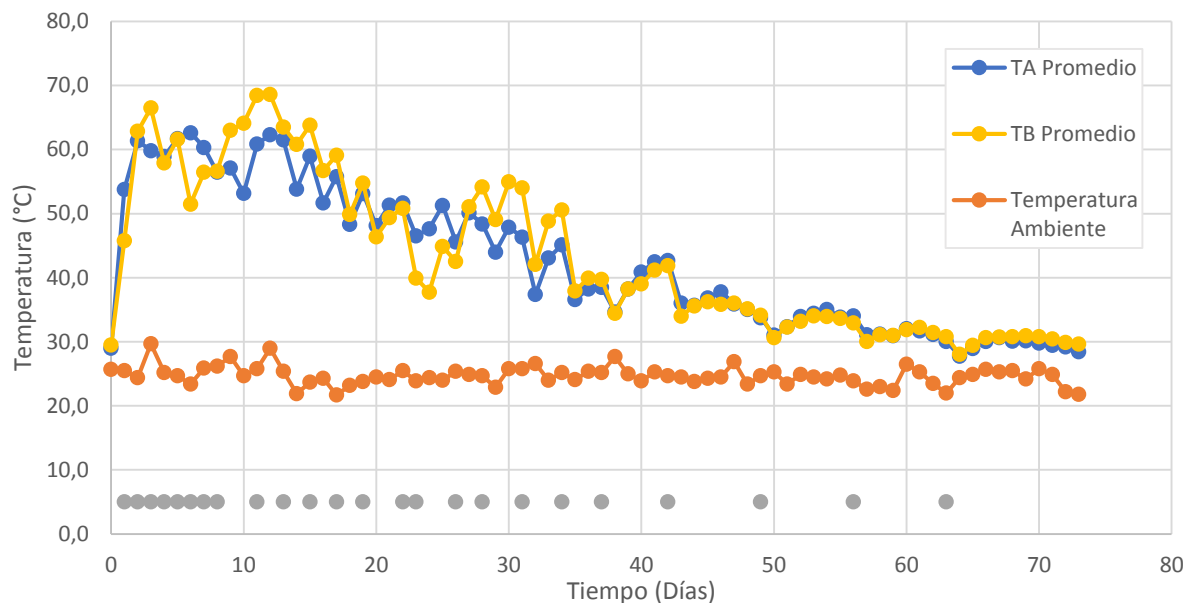


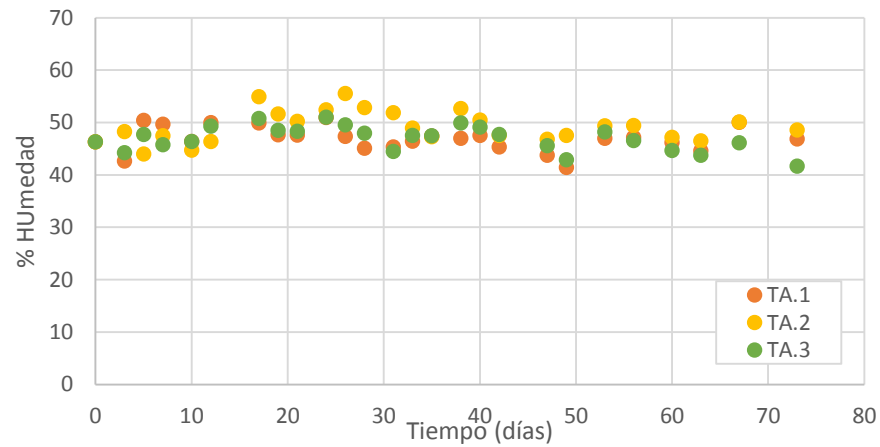
Figura 4. Comportamiento promedio de la temperatura en los tratamientos TA y TB

3.1.2 Humedad. El proceso al inicio registró humedades de 46.32% en ambos tratamientos. El día 2 se adicionaron 20 litros de agua para todos los tratamientos. Los primeros días del proceso se necesitó mayor humectación dado que las temperaturas eran mayores a los 55°C y por ello se realizó humectación cuatro veces los primeros 6 días. A lo largo del proceso y dependiendo de los resultados de las pruebas de humedad realizadas en el laboratorio, se procedió a humectar si así se requiriera. En la Gráfica 3, se observa que el día 7 los tratamientos TB1 y TB2 presentan comportamientos atípicos, esto se debe al posible exceso de humectación asociada a eventos de precipitación que afectaron temporalmente al material en proceso. En la Tabla 3 se muestran las cantidades de agua adicionadas y las humedades obtenidas al inicio y final de proceso.

Tabla 3.

Resumen de humedad y adición de agua

Tratamiento	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Total días de humectación (Días)	Total litros de agua adicionados (L)
TA1	46.32	46.91	11	155
TA2	46.32	48.61	11	140
TA3	46.32	41.72	11	150
TB1	46.32	42.97	9	115
TB2	46.32	44.68	10	115
TB3	46.32	45.11	10	130

*Figura 5. Comportamiento de la humedad en el tratamiento TA*

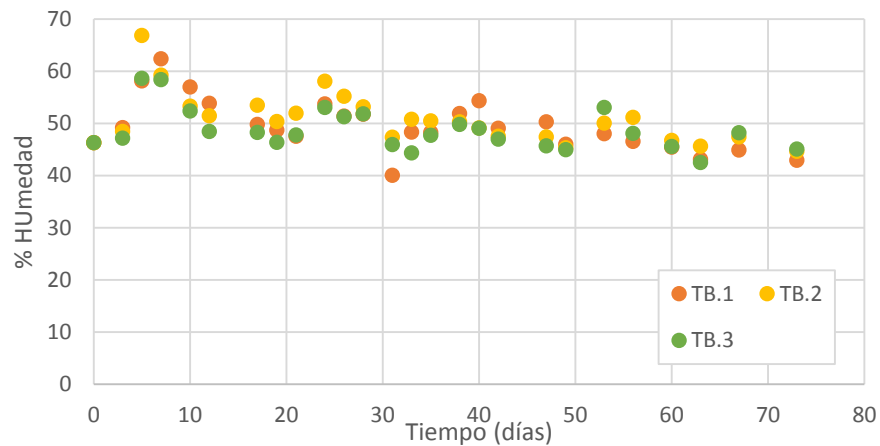


Figura 6. Comportamiento de la humedad en el tratamiento TB

3.1.3 pH. El pH es un parámetro que indica el grado de acidez o alcalinidad en la que se encuentra el material y está relacionado con cada una de las fases del proceso de compostaje. En los primeros días del proceso, todos los tratamientos tienen un pH ácido, esto ocurre debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica formando ácidos orgánicos (Ballén Buitrago et al., 2017).

Posteriormente, los valores de pH comienzan a subir y pueden llegar a niveles tan altos entre 8 y 9 como consecuencia de la liberación de CO_2 y la producción de amoníaco en la degradación de las proteínas (Sepúlveda & Alvarado, 2013) para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro; los valores de pH óptimos oscilan entre 4.5 y 8.5 (Román et al., 2013). Los valores máximos de pH fueron 9.15, 8.76 y 8.64 para los tratamientos TA1, TA2 y TA3 respectivamente y 8.9, 8.88 y 8.84 para los tratamientos TB1, TB2 y TB3 respectivamente, esto indica un exceso de nitrógeno en el material de origen (Román et al., 2013).

En la Gráfica 4 y 5 se muestran los valores de pH obtenidos durante el proceso.

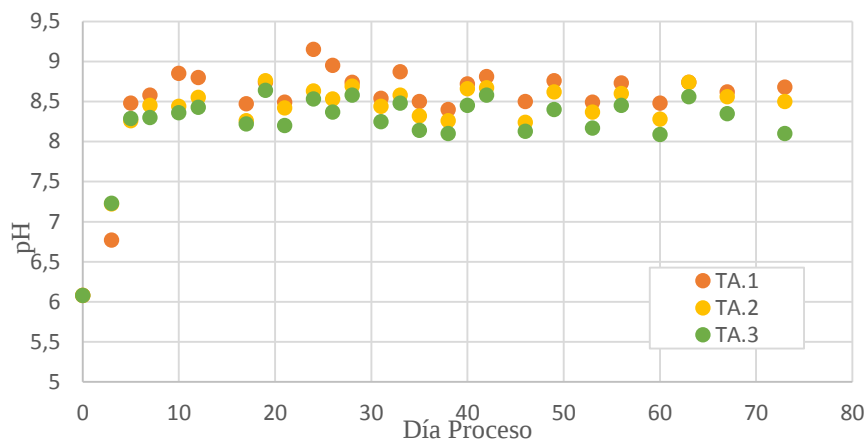


Figura 7. Comportamiento del pH en el tratamiento TA

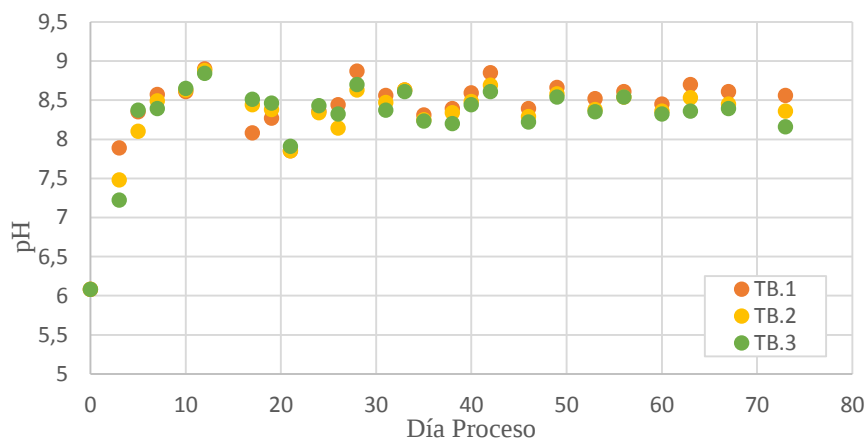


Figura 8. Comportamiento del pH en el tratamiento TB

3.1.4 Conductividad eléctrica (CE). El valor inicial para la CE de todos los tratamientos fue de 1.231 mS/cm, en las Gráficas 6 y 7 se muestran los diferentes valores de CE obtenidos durante el proceso, dichos valores oscilaron entre 0.648 mS/cm y 1.507 mS/cm, estos valores se encuentran por debajo de los valores que pueden inhibir en la actividad microbiana los cuales están comprendidos entre los 3 y 5 mS/cm (Hernández Gómez, 2017). Según la Comisión Nacional del Medio Ambiente, el compost con valores de CE menores o iguales a 5 mS/cm puede

ser aplicado directamente en macetas sin necesidad de mezclarse con otros elementos (CONAMA, 2000).

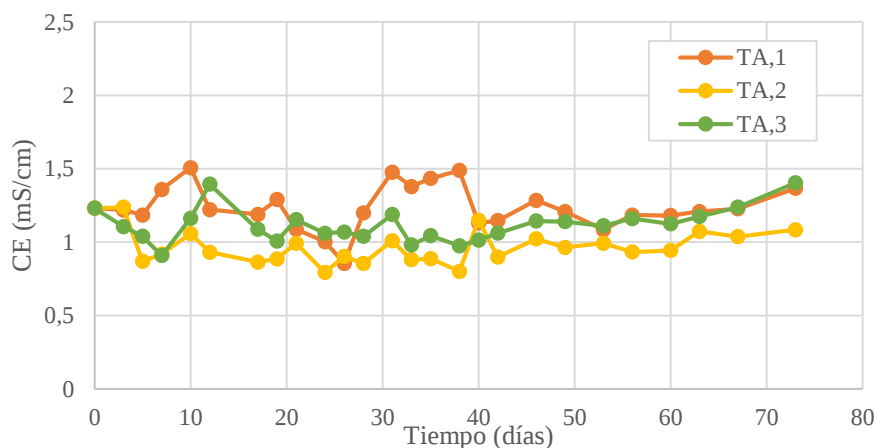


Figura 9. Comportamiento de la CE en el tratamiento TA

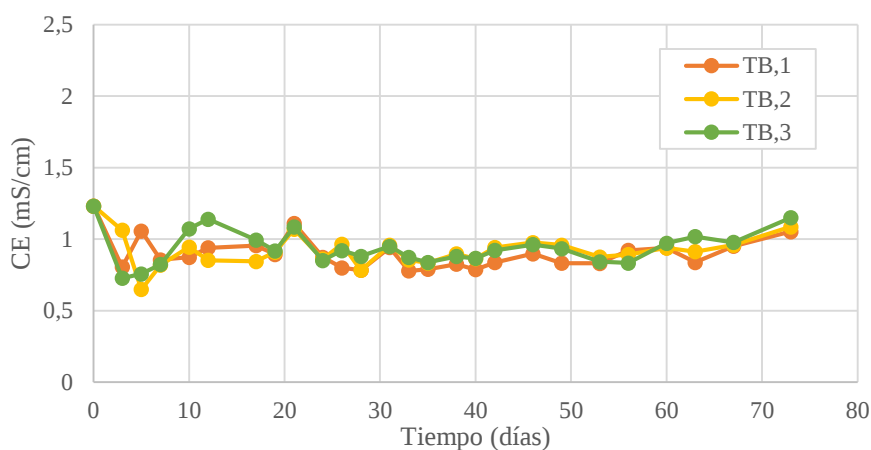


Figura 10. Comportamiento de la CE en el tratamiento TB

3.1.5 Aireación. Para mantener condiciones aeróbicas durante todo el proceso es necesario mantener la concentración de oxígeno mayor al 10%. Esto garantiza una buena respiración de los microorganismos y a su vez evita que el material se compacte (Román et al., 2013).

A lo largo del proceso y para garantizar una buena aireación se realizaron volteos manuales. Al inicio del proceso se registraron valores de concentración de oxígeno de aproximadamente 50% y al finalizar se registraron valores alrededor de los 90%. Esto indica que durante todo el proceso de compostaje hubo un adecuado suministro de oxígeno en todas las unidades experimentales. En las Gráficas 8 y 9 se evidencian el comportamiento de la concentración de oxígeno y la frecuencia de los volteos realizados. En la Gráfica 9 se observa que el día 46 las pilas TA1 y TA3 no registran valores de CO, esto debido a que el equipo presentó fallas.

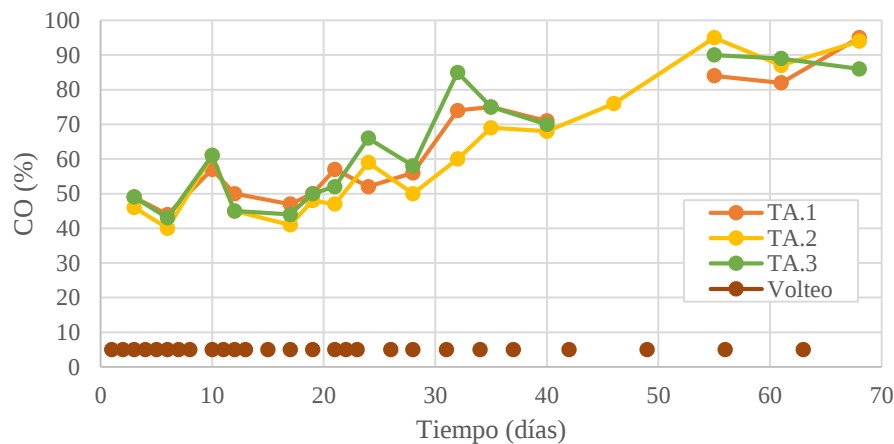


Figura 11. Comportamiento de CO y volteos en el tratamiento TA

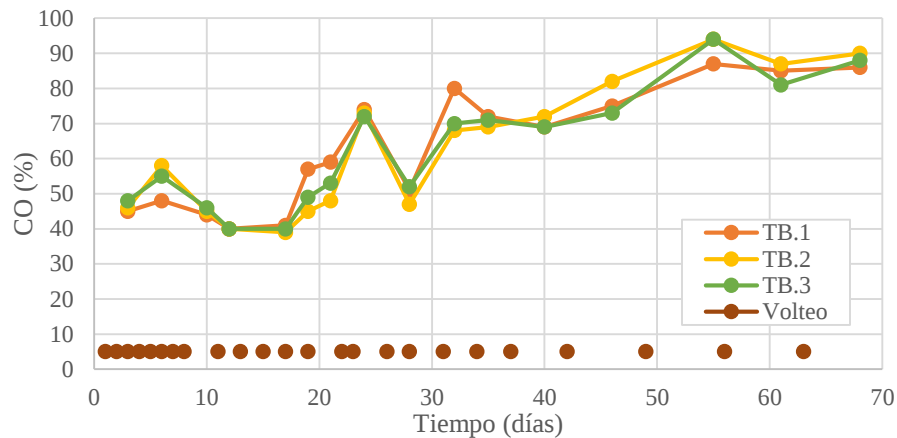


Figura 12. Comportamiento de la CO y volteos en el tratamiento TB

3.1.6 Peso volumétrico. El peso volumétrico o densidad aparente es una relación entre el peso y volumen del material, que ayuda a evaluar el grado de compactación del compost. A lo largo del proceso de compostaje el peso volumétrico tiende a aumentar debido a que las partículas se van degradando siendo una medida indirecta de la degradación de la materia orgánica (Gordillo & Chávez, 2010).

Al iniciar el proceso el peso volumétrico tuvo valores cercanos a 0.25 g/cm³ y al finalizar se obtienen valores cercanos a 0.55 g/cm³. Estos valores están comprendidos entre el valor reportado en la literatura el cual es menor a 0.6 g/cm³ (Gordillo & Chávez, 2010). En la Gráfica 10 y 11 se evidencian el comportamiento del peso volumétrico en los tratamientos, observándose que en los tratamientos TA el peso volumétrico fue mayor, es decir, que el material obtuvo una degradación más alta, esto se puede comprobar en los resultados del tamizado (Anexo E).

En la Gráfica 11 se observa un aumento del peso volumétrico en los primeros días, esta variación está relacionada al incremento de la humedad en el tratamiento TB.

TA

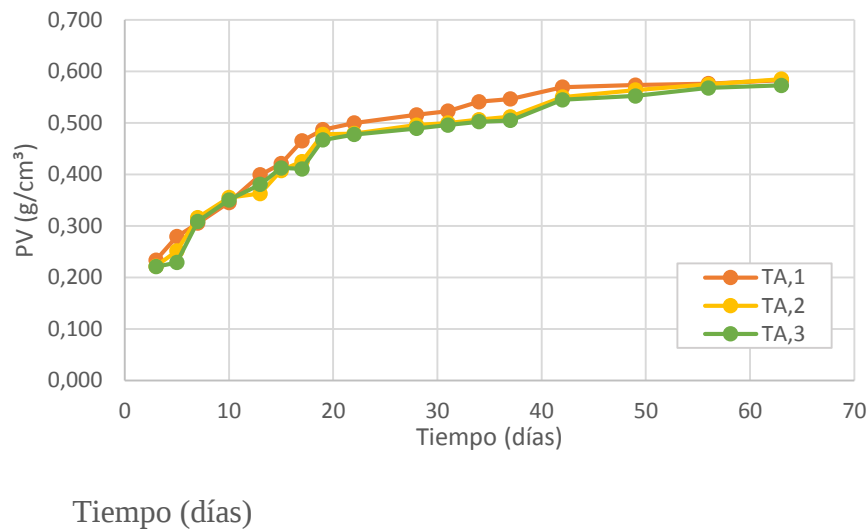


Figura 13. Comportamiento del PV en el tratamiento

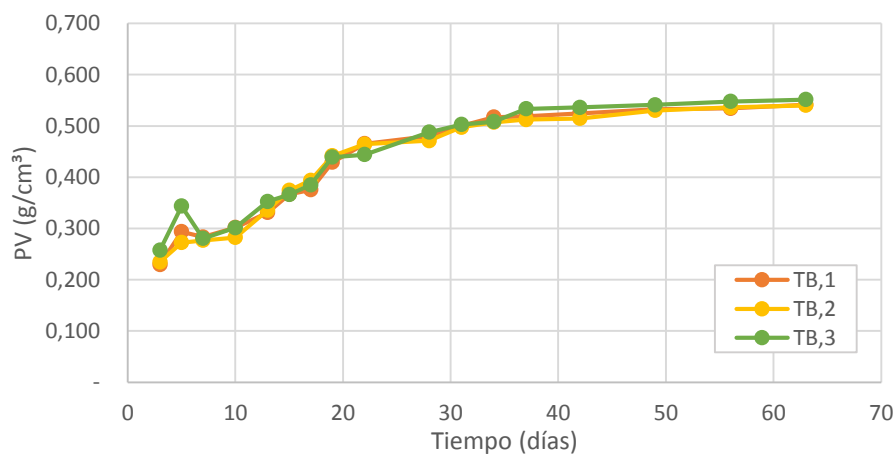


Figura 14. Comportamiento del PV en el tratamiento TB

3.1.7 Sólidos volátiles. Esta prueba arroja una aproximación del contenido de material orgánico presente, a medida que el proceso de compostaje avanza, la materia orgánica va disminuyendo dado que los microorganismos la están degradando. En las Gráficas 12 y 13 se puede notar este fenómeno. Al comienzo del proceso se puede observar que se tiene un porcentaje de materia orgánica disponible del 80% y al finalizar el proceso el contenido de materia orgánica

se encuentra alrededor de los 50%, cumpliendo con los valores que propone la Comisión Nacional del Medio Ambiente, el cual debe ser mayor o igual al 25% (CONAMA, 2000). También se puede notar que la mayor degradación se presenta en la fase termofílica, respondiendo a la acción de los microorganismos los cuales están degradando la materia orgánica como las ceras, polímeros y hemicelulosa que son transformadas en humus (Román et al., 2013).

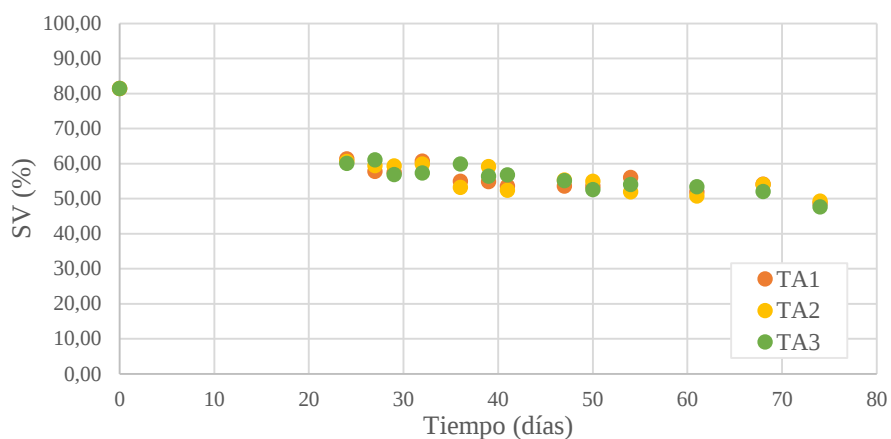


Figura 15. Comportamiento de los SV en el tratamiento TA

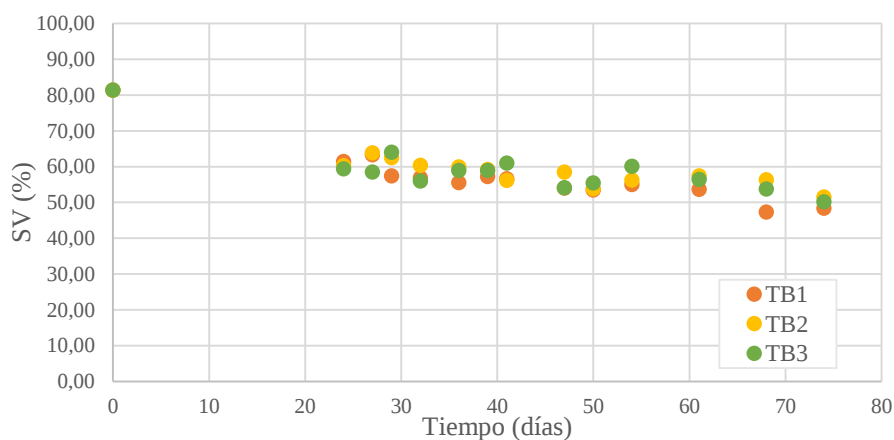


Figura 16. Comportamiento de los SV en el tratamiento TB

3.2 Pruebas de madurez

3.2.1 Germinación. Las pruebas de germinación se empezaron a realizar a partir del día 31, obteniendo un índice de germinación de aproximadamente 200% superando el 80% que dice la norma chilena NCh 2880, con esto se puede ver que los niveles de fitotoxidad son bajos (Tiquia, Tam, & Hodgkiss, 1996). Esto es apoyado por los niveles de CE que son menores a 1 mS/cm. A lo largo del proceso se realizaron cinco pruebas de germinación las cuales registraron índices altos, lo que responde a una reducción de sustancias fitotóxicas y a la presencia de materia orgánica enriquecida en sustancias húmicas y nutrientes (Loubna, Hafidi, & Ouhdouch, 2016). En la Gráfica 14 se pueden observar dichos resultados.

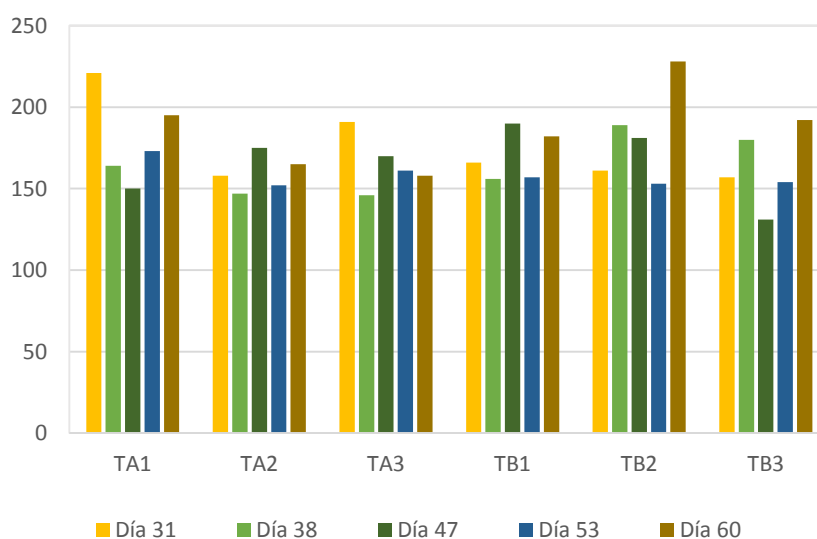


Figura 17. Resultados Índice de germinación

3.2.2 Estabilidad. También conocida como prueba de autocalentamiento, esta prueba proporciona información sobre la actividad biológica y por consiguiente su grado de

descomposición (López Macías, 2002). El día 63 se iniciaron estas pruebas. Como resultado se obtuvo que todos los tratamientos se encontraron en un grado de estabilidad V, es decir, compost muy estable y muy maduro (Brinton et al., 1992). En la Gráfica 15 se puede observar que, desde el inicio de la prueba, la temperatura no mostró variaciones significativas y se mantuvo estable durante los 4 días que duró la prueba. (Ver resultados en Anexo G).

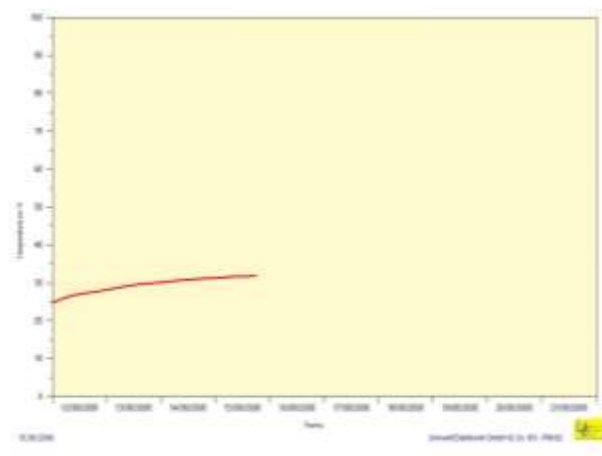


Figura 18. Resultado prueba de estabilidad

Nota: El eje y de la gráfica corresponde a la temperatura en (°C) y el eje x el tiempo (Días).

4. Dimensionamiento de la planta compostaje

4.1 Ubicación

En la Figura 4 se puede observar la ubicación de la planta actual de compostaje de la sede central de la UIS, ubicada al noreste de la universidad por detrás de las canchas múltiples ($7^{\circ}08'30''\text{N}$ $73^{\circ}07'04''\text{W}$). En el Anexo H se muestra la ubicación más detallada.



Figura 19. Ubicación planta compostaje

4.2 Etapas/Procedimiento

4.2.1 Recepción y almacenamiento. Son todas las operaciones que tienen lugar al momento de la llegada de los materiales a la planta, como la recepción, descarga e identificación de los materiales (RV, RAP y RANP) registrando su peso para su respectivo control.

4.2.2 Separación y selección del material a compostar. En esta sección los diferentes materiales se separan y se pesan para después ser utilizados en el proceso de compostaje.

4.2.3 Trituración y mezcla del material a compostar. Para lograr un correcto proceso se procede a triturar los materiales a un tamaño adecuado para después realizar la mezcla de estos respecto a su proporción seleccionada. Para que el compostaje se desarrolle correctamente, es necesario que el conjunto de parámetros que afectan el proceso se mantenga dentro de los valores considerados ideales (Cataluña, 2016). En la Tabla 4, se muestran los valores recomendados de los parámetros que afectan el proceso.

Tabla 4.

Valores recomendados parámetros del proceso de compostaje

Parámetro	Rango	Unidades
Humedad	50-70	%
Porosidad	25-35	%
C/N	25-35	Tanto por uno
N/P	<10	Tanto por uno
pH	6--8	--
Materia orgánica	>40	% sms

Nota. Adaptado de Cataluña (Cataluña, 2016)

4.2.4 Etapa de descomposición. En esta etapa se produce la descomposición biológica de la materia orgánica, que se caracteriza por la reducción del peso y del volumen, también se deben evitar altas temperaturas ($>70^{\circ}\text{C}$) y condiciones anaerobias (sin presencia de oxígeno) (Loubna et al., 2016). Se deben monitorear ciertos parámetros del proceso como la temperatura, humedad,

pH, conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto en la mezcla, realizando volteos manuales y humectación cuando sea necesario.

4.2.5 Etapa de maduración. Es la parte final del proceso, la temperatura disminuye hasta acercarse a valores cercanos a la temperatura ambiente, en esta etapa del proceso se realizan pruebas como la germinación y la estabilidad para conocer si el producto final se encuentra listo y conocer su grado de maduración.

4.2.6 Tamizaje y almacenamiento del producto final. Cuando el compost se encuentra estable se procede a tamizarlo y empacarlo para su respectivo almacenamiento.

4.2.7 Distribución/Transporte. El producto final es trasladado a diferentes lugares donde se utilizará.

En la Figura 5 se observa el diagrama de proceso de la planta de compostaje.

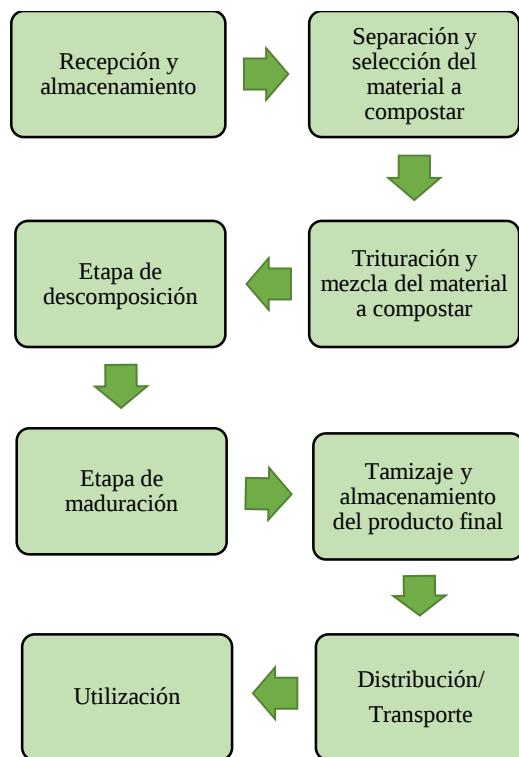


Figura 20. Diagrama del proceso de la planta de compostaje

4.2 Herramientas necesarias durante el proceso

- *Tres (3) machetes para la correcta homogenización de los materiales durante la mezcla.
- *Una (1) carretilla para el movimiento de material en la planta.
- *Dos (2) palas grandes, un (1) azadón y una (1) pala pequeña para los volteos manuales.
- *Una (1) trituradora de materia orgánica.
- *Una (1) balanza de capacidad de 200 kg.
- *Una (1) balanza de capacidad de 5 kg.
- *Tres (3) escobas para limpieza.
- *Un (1) tamiz de 3-4mm de abertura.
- *Tres (3) cestas para basura.

*1 juego de uniforme, guantes, botas, gafas y máscara de protección facial para cada trabajador.

*Un (1) medidor de temperatura/humedad.

*Un (1) lector de pH.

*Agua destilada.

*Un (1) medidor de oxígeno.

4.3 Mano de obra requerida

Se necesitarían cinco personas, un supervisor encargado de gestionar los registros de la planta, rendimiento y contabilidad, tres personas a tiempo completo para monitorear todas las etapas del proceso, como humectación, volteos manuales, recepción de los materiales y distribución, una persona encargada del laboratorio para la realización de las pruebas de calidad del proceso (Humedad, temperatura, pH, germinación y estabilidad) y una persona encargada del mantenimiento de los equipos eléctricos y electrónicos. En la Tabla 5 se muestran los requerimientos de personal para la planta tomando como guía el libro “Decentralised Composting for Cities of Low- and Middle- Income Countries A Users’ Manual” (Rothenberger, Zurbrugg, Enayetullah, & Sinha, 2006).

En la Figura 6 se muestra la propuesta de dimensionamiento de la planta de compostaje y en el Anexo I se muestra la ubicación más detallada de la planta de compostaje.

Tabla 5.

Requerimientos de personal

Cargo	Disponibilidad	Requeridos	Funciones
Supervisor	Parcial	1	Gestionar los registros de la planta, rendimiento y contabilidad
Trabajadores planta	Completo	3	Monitorear etapas del proceso como humectación, volteos manuales, recepción de los materiales y distribución
Encargado del laboratorio	Parcial	1	Encargado de las pruebas de calidad del proceso
Mantenimiento maquinaria	Parcial	1	Encargado del mantenimiento de los equipos eléctricos/electrónicos

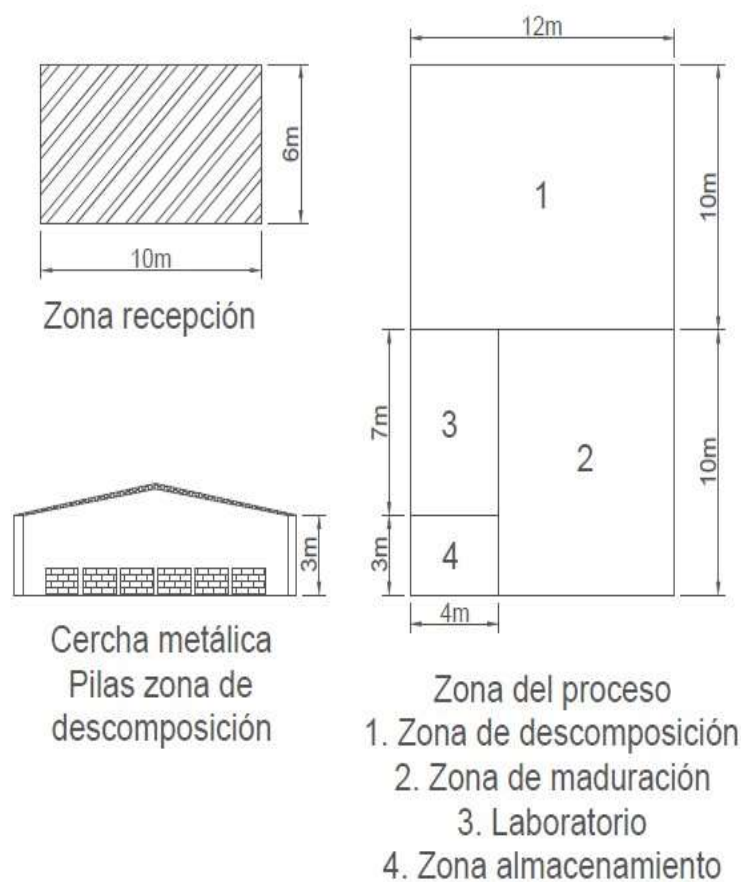


Figura 21. Dimensionamiento planta de compostaje

5. Conclusiones

La temperatura se comportó acorde a lo registrado en la literatura, en los tratamientos se pudo evidenciar cada una de las fases a lo largo del proceso, se presentaron diferencias en términos del proceso en dos etapas vs el tradicional, la fase mesofílica tuvo duración de 1 día en ambos tratamientos, en TA la fase termofílica logró registrar los dos picos de temperatura que caracterizan este método, reduciendo el tiempo de esta fase. Sin embargo, en TB se presentaron temperaturas más altas en la fase termofílica. Por consiguiente, hubo mayor degradación de materia orgánica. En la fase de maduración y enfriamiento ambos tratamientos tuvieron un comportamiento similar, lo cual muestra que no hubo aceleración en los tiempos del proceso. Se concluye que el TB es la mejor opción dado que mostró mayor degradación en la fase termofílica y su implementación es más sencilla.

Los resultados de las pruebas de CE registran valores mayores en TA con respecto a TB. Este comportamiento se evidencia en las pruebas de germinación donde TA registra índices de germinación menores en comparación a TB. Las pruebas de SV y PV mostraron un comportamiento similar en ambos tratamientos y en relación con la aireación, el proceso se mantuvo en niveles altos de CO, garantizando las condiciones aeróbicas a lo largo del proceso.

Se obtuvo un producto estable dado que registró el grado V en la prueba de estabilidad, se puede decir que no se va a tener ningún problema en cuanto a la aplicación agrícola, esto es apoyado por los niveles de CE registrados, los cuales se encuentran dentro de los rangos establecidos en la

norma de calidad del compost. A su vez, los índices de germinación presentados al final del proceso indican un valor mayor al 80% por lo que los niveles de fitotoxidad son bajos.

Con respecto al dimensionamiento el área a intervenir es de aproximadamente 400 m² para garantizar una distribución adecuada de las zonas requeridas para el proceso de compostaje.

Para obtener un producto final con altos estándares de calidad se recomienda mejorar la zona donde actualmente se está realizando el proceso ya que las instalaciones actuales presentan problemas en su infraestructura (Tejado y drenaje) afectando algunos parámetros del proceso, los materiales almacenados son expuestos a la intemperie siendo afectados por la lluvia y el sol afectando las propiedades físicas de estos.

Referencias Bibliográficas

- Argyropoulos, D. S., & Menachem, S. Ben. (1997). Lignin. In *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology* (Vol. 57, pp. 127–158). <https://doi.org/10.1002/9783527620999>
- Ballén Buitrago, D. M., Mateus Montañez, O. L., Mora León, J. L., & Salazar Cáceres, J. R. (2017). Un camino para salvar el mundo: Residuos sólidos y compostaje. In C. U. M. de D. UNIMINUTO (Ed.), *Colección Cuadernillos de Investigación* (1st ed., p. 148). Bogotá D.C.
- Barragan Gordillo, R. D., & Gomez Cossio, F. (2018). *Estimación de la producción y composición física de los residuos verdes generados en el campus central de la universidad industrial de santander. III*, 224–234.
- Brinton, W. F., Evans, E., Droffner, M. L., & Brinton, R. B. (1992). *A standardized dewar test for evaluation of compost self-heating. 1982*, 1–16.
- Bueno, P., Díaz, J., & Cabrera, F. (2012). Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje. *Compostaje*. Retrieved from [http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores que afectan al proceso de compostaje.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf)
- Bustamante, M. A., Ceglie, F. G., Aly, A., Mihreteab, H. T., Ciaccia, C., & Tittarelli, F. (2016). Phosphorus availability from rock phosphate: Combined effect of green waste composting and sulfur addition. *Journal of Environmental Management*, 182, 557–563. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.016>
- Calderon, A., & Medina, J. (2018). *Evaluación de la aplicación de estrategias operativas en el mejoramiento y optimización del proceso del compostaje de residuos verdes*.
- Cataluña, A. de R. (2016). *Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje*. 94.

CONAMA. (2000). *Norma de calidad de compost*. 1–18.

Dalzell, H. ., Biddelstone, A. J., Gray, K. R., & Thuraniranjana, K. (1987). Soil management: compost production and use in tropical and subtropical environments. *Coletín 56 de Suelos de La FAO*, (6.6), 134.

FAO. (2007). Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. In *Boletín FAO Fertilizantes y Nutrición Vegetal* (Vol. 13). Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-y5053s.pdf>

Forero Rivera, R. A., & Pachón Ferro, C. F. (2015). *Análisis del compostaje de residuos orgánicos de rápida degradación para su implementación en la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga*.

Gordillo, F., & Chávez, E. (2010). Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros. *Centro de Investigación Científica y Tecnológica*, 10. Retrieved from [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/9112/1/Evaluación Comparativa de la calidad del compost.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/9112/1/Evaluación%20Comparativa%20de%20la%20calidad%20del%20compost.pdf)

Hernández Arboleda, L. B., & Gaitán Prada, C. A. (2014). Evaluación de la calidad fisicoquímica de los residuos orgánicos de rápida degradación generados en el campus universitario como potencial materia prima del proceso de compostaje. *Lincoln Arsyad*, 3(2), 1–46. <https://doi.org/http://dx.doi.org/110.21043/equilibrium.v3i2.1268>

Hernández Gómez, A. M. (2017). *Evaluación del proceso del compostaje de pollinaza fresca y otros materiales orgánicos generados en el páramo de Berlín*. 1–14.

ICONTEC. (2004). *Productos para la industria agrícola productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo norma técnica colombiana 5167 Editada*. 1–32.

Kumar, M., Ou, Y.-L., & Lin, J.-G. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30(4), 602–609. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.11.023>

- Levis, J. W., Barlaz, M. A., Themelis, N. J., & Ulloa, P. (2010). Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada. *Waste Management*, 30(8–9), 1486–1494. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2010.01.031>
- Liang, C., Das, K. ., & McClendon, R. . (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86(2), 131–137. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00153-0)
- López Macías, P. (2002). *Compostaje de residuos orgánicos* (1st ed.; F. de Ingeniería, Ed.). Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Loubna, E. F., Hafidi, M., & Ouhdouch, Y. (2016). Artemia salina as a new index for assessment of acute cytotoxicity during co-composting of sewage sludge and lignocellulose waste. *Waste Management*, 50, 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.002>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). Manual de Compostaje. *Amigos de La Tierra*, 21. Retrieved from http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/manual_de_compostaje_2011_paginas_1-24_tcm7-181450.pdf%0Apapers3://publication/uuid/B3A2C71D-750D-488A-952C-C3C22FBB9173
- Naher, U. A., Sarkar, M. I. U., Jahan, A., & Biswas, J. C. (2018). Co-Composting Urban Waste, Plant Residues, and Rock Phosphate: Biochemical Characterization and Evaluation of Compost Maturity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(6), 751–762. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435799>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2019). Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality. *Waste and Biomass Valorization*, 10(1), 63–74. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0047-2>
- Reyes Torres, M., Oviedo Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77, 486–499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>

- Röben, E. (2002). Manual de Compostaje Para Municipios. *Ilustre Municipio de Loja*, 68. Retrieved from www.ded.org.ec
- Román, P., Martinez, M. M., & Alberto, P. (2013). *Manual Compostaje FAO*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Rothenberger, S., Zurbrügg, C., Enayetullah, I., & Sinha, a H. M. M. (2006). *Decentralised Composting for Cities of Low- and Middle- Income Countries*.
- Salinas, C., León, M. de los A., Pérez, M. I., & Yagello, J. (2018). *Manual de compostaje para zonas frías*.
- Sepúlveda, L. A., & Alvarado, J. A. (2013). *Manual de compostaje doméstico. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá*. Retrieved from <http://www.metropol.gov.co/Residuos/Documents/Cartillas/Manual Compostaje.pdf>
- Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y., & Hodgkiss, I. J. (1996). Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 93(3), 249–256. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(96\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00052-8)
- Trautmann, N. M., & Krasny, M. E. (2012). Composting in the classroom. *Resource Recycling*, 31(1).
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & It, M. (2000). *Biodegradation of lignin in a compost environment: a review*. 72, 169–183. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2017). *World Population Prospects The 2017 Revision*.
- Van den Berghe, C., Kakana, P., Sota, P., & Rwigema, J. (1993). Efficacité de la roche phosphatée de Matongo au travers d'un compostage sur une culture de pomme de terre sur un sol acide de Rabi (Burundi). *Tropicultura*, Vol. 11, pp. 142–146.
- Varma, V. S., Prasad, R., Deb, S., & Kalamdhad, A. S. (2018). Effects of Aeration During Pile Composting of Water Hyacinth Operated at Agitated, Passive and Forced Aerated

Condition. *Waste and Biomass Valorization*, 9(8), 1339–1347.
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-9876-2>

Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). *Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje*. 7(1), 28–37.

Zhang, L., & Sun, X. (2014). Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar. *Bioresource Technology*, 171(1), 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.079>

Zhang, L., Sun, X., Tian, Y., & Gong, X. (2013). Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste. *Bioresource Technology*, 131, 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.059>

Zoes, V., Dinel, H., Paré, T., & Jaouich, A. (2001). Growth substrates made from duck excreta enriched wood shavings and source-separated municipal solid waste compost and separates: Physical and chemical characteristics. *Bioresource Technology*, 78(1), 21–30. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00169-3)

Apéndices

Apéndice A. Investigaciones con adición de roca fosfórica en el compostaje

<i>AUTOR</i>	<i>AÑO</i>	<i>ADICIÓN DE ROCA FOSFORICA</i>	<i>PRINCIPALES RESIDUOS</i>	<i>RESULTADO</i>
P.C. Moharana, D.R. Biswas	2016	2%	Residuos de cultivos como paja de arroz, de trigo, rastrojo de mostaza, de garbanzos y hojas de árboles	Mejora la calidad del compost en términos de contenido de fósforo y mejora la disponibilidad de fósforo
M.A. Bustamante, F.G. Ceglie, et. Al	2016	2,3% y 4,6%	Constituidos por podas de palmeras, recoortes de pasto, árbol de olivo y coníferas	Mejoró la disponibilidad de fosforo
U. A. Naher, M. I. U. Sarkar, A. Jahan & J. C. Biswas	2018	5% y 8%	Mezcla de pepino, calabaza de botella, calabaza amarga, verduras de hoja, desperdicios de cocina como arroz cocido, pescado crudo, cascara de huevo y platana, papa y cebolla	Aumentó las actividades de las bacterias solubilizadoras de fosfato
Calderón & Medina	2018	15%	Residuos verdes, residuos de alimentos crudos, residuos de alimentos procesados y aserrín	Mejora la germinación
C. Van den Berghe, P. Kakana, et. Al	1993	3kg y 6kg	Biomasa local: sedimento de seetaria y otras hierbas de pantano	Más rico en calcio y fosforo
E. Compaoré & L.S. Nanéma	2010	3%	Residuos sólidos de depósitos silvestres, estiércol y paja	Se encontró que el compost obtenido es de mayor calidad comparado con el de solo basura
Maryam Mushtaq; M. K. Iqbal; A. Khalid; R. A. Khan	2018	2%	Desechos de aves de corral y cascara de arroz	La adición de roca fosfórica mejoró el pH del compost

Apéndice B. Procedimiento para calcular la relación C/N teórica

Para calcular la relación C/N se hizo uso de la ecuación (1) la cual fue obtenida del libro *Composting in the Classroom* (Trautmann & Krasny, 2012), adicional a ello se analizaron las propiedades fisicoquímicas, con las masas de cada uno de los materiales y la disponibilidad se calculó la relación C/N hasta obtener un valor de 19,84.

$$R = \frac{W_1[C_1 \times (100 - M_1)] + W_2[C_2 \times (100 - M_2)] + W_3[C_3 \times (100 - M_3)] + \dots}{W_1[N_1 \times (100 - M_1)] + W_2[N_2 \times (100 - M_2)] + W_3[N_3 \times (100 - M_3)] + \dots} \quad (1)$$

En donde:

R = Relación C/N de la mezcla

W_n = Masa del material n (Kg)

C_n = Carbono del material n (%)

N_n = Nitrógeno del material n (%)

M_n = Contenido de humedad del material n (%)

Con el uso de la ecuación (2), de la misma fuente bibliográfica, se determinó el contenido de humedad total con la que iniciaría la mezcla, esto con la finalidad de saber si al iniciar el proceso se debe humectar.

$$G = \frac{(W_1 \times M_1) + (W_2 \times M_2) + (W_3 \times M_3) + \dots}{W_1 + W_2 + W_3 + \dots} \quad (2)$$

En donde:

G = Contenido de humedad total (%)

W_n = Masa del material n (Kg)

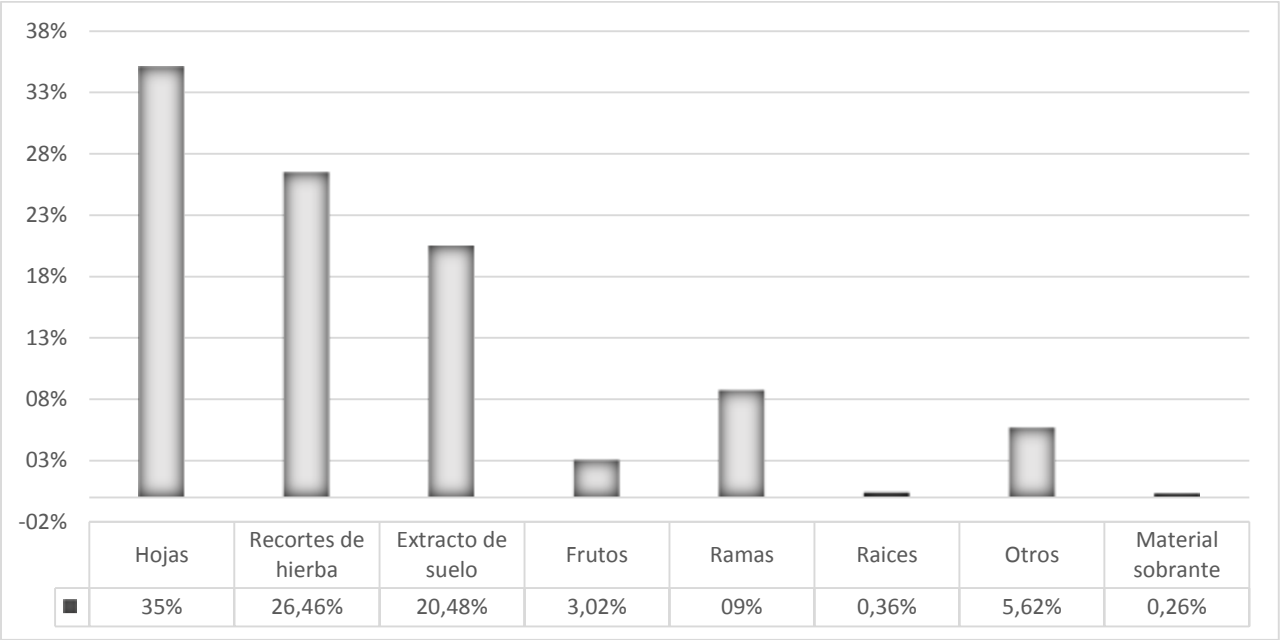
M_n = Contenido de humedad del material n (%)

Apéndice C. Valores de referencia de las propiedades fisicoquímicas

Los valores de referencias tomados para realizar el cálculo de la relación C/N

Material	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Humedad (%)	Referencia
Residuos verdes	24.1	1.62	25.4	Oviedo et al 2017
Residuos de alimentos no elaborados	31.95	1.97	86.98	Hernández 2014
Residuos de alimentos procesados	15.87	3	71.97	Oviedo et al 2017; Cruz 2016
Aserrín	46.5	0.07	8.12	Huang 2004

Apéndice D. Caracterización de los Residuos Verdes



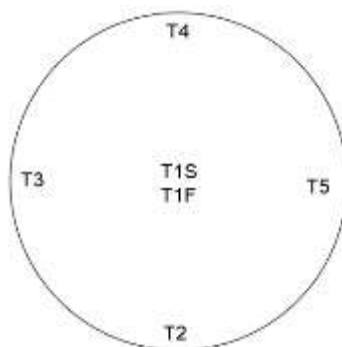
Apéndice E. Muestreo y equipos utilizados

Figura 7. Puntos toma de temperatura y muestreo para pruebas de laboratorio



Figura 8. Prueba de Germinación



Imagen 1 Mufla MFR-2015



Imagen 2 pH-metro sensION™ + MM374



Imagen 3 Sonda CM37



Imagen 4 Caracterización de los Residuos Verdes



Imagen 5 Tamizado del compost

Gráfica 16. Resultados del producto tamizado y rechazo

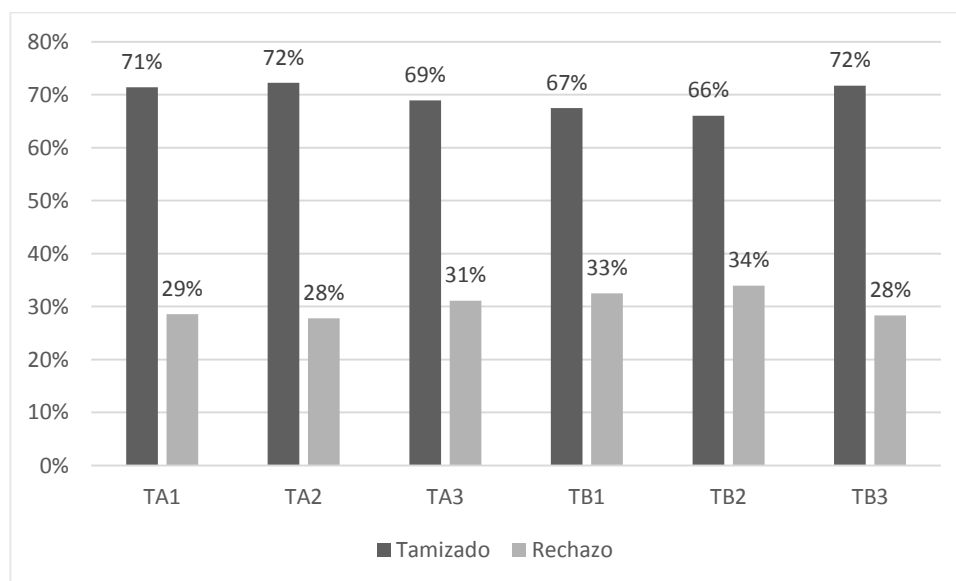




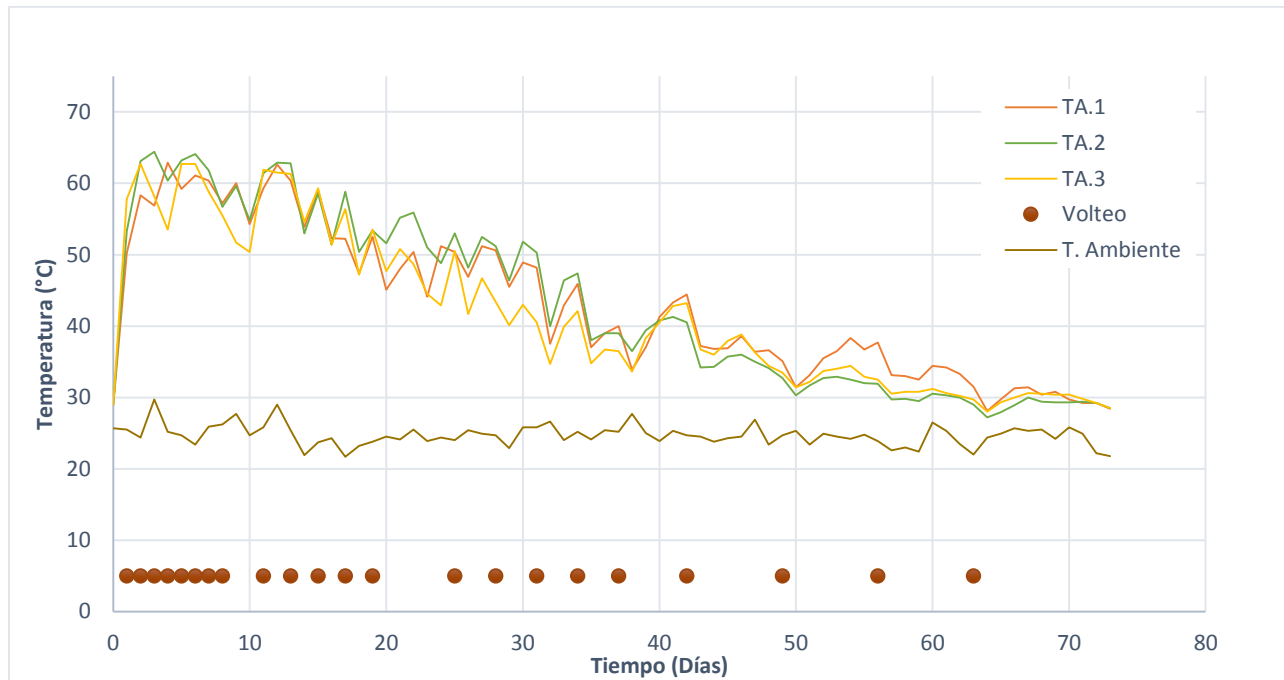
Imagen 6 Inicio del proceso



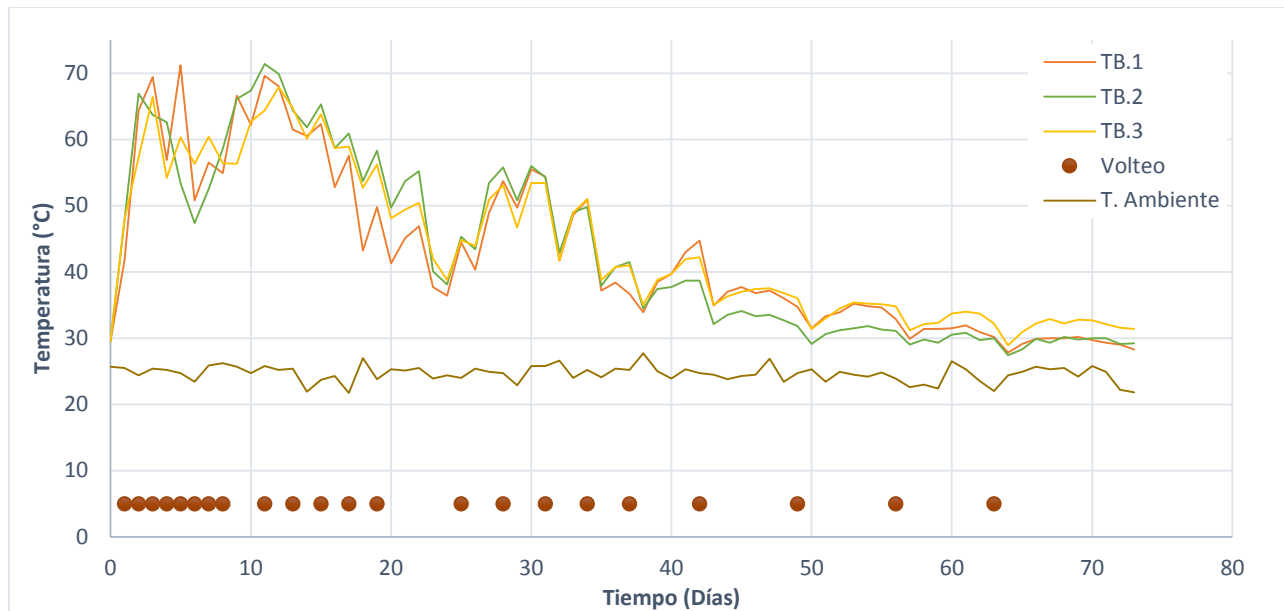
Imagen 7 Producto final

Apéndice F. Comportamiento de la temperatura de las réplicas en los tratamientos TA y TB

Gráfica 17. Comportamiento de la temperatura en los tratamientos TA

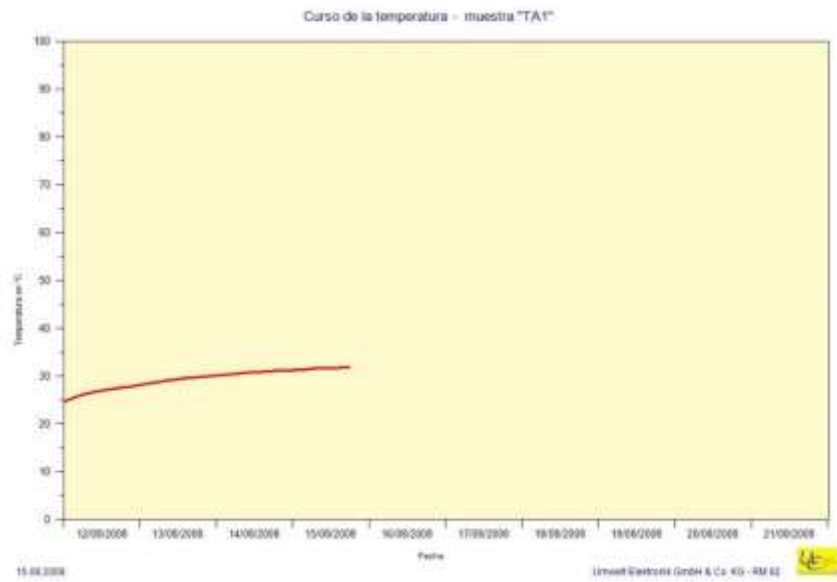


Gráfica 18. Comportamiento de la temperatura en los tratamientos TB



Apéndice G. Resultados de prueba de estabilidad realizada con el equipo RM 82

Gráfica 19. Prueba de estabilidad tratamiento TA1



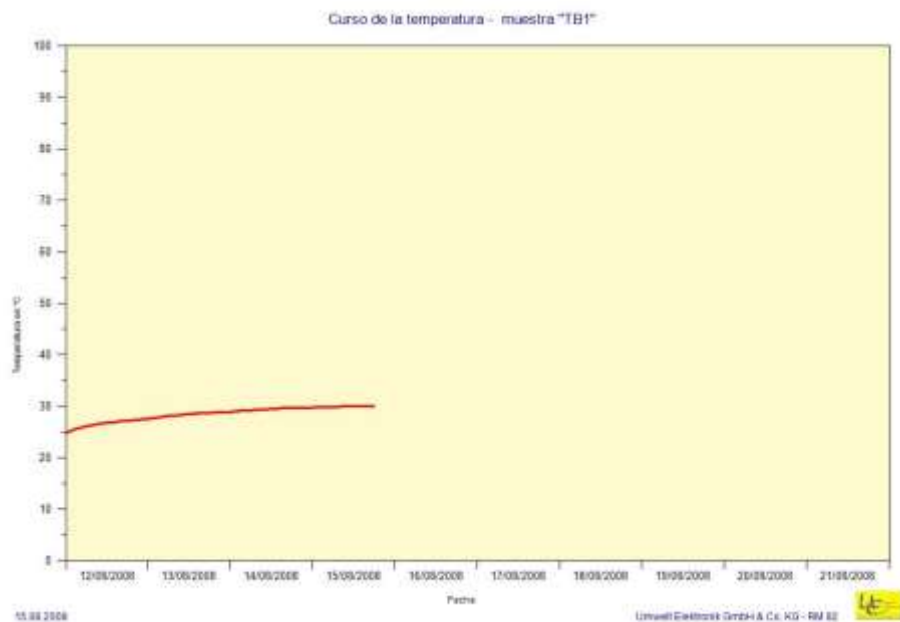
Gráfica 20. Prueba de estabilidad tratamiento TA2



Gráfica 21. Prueba de estabilidad tratamiento TA3



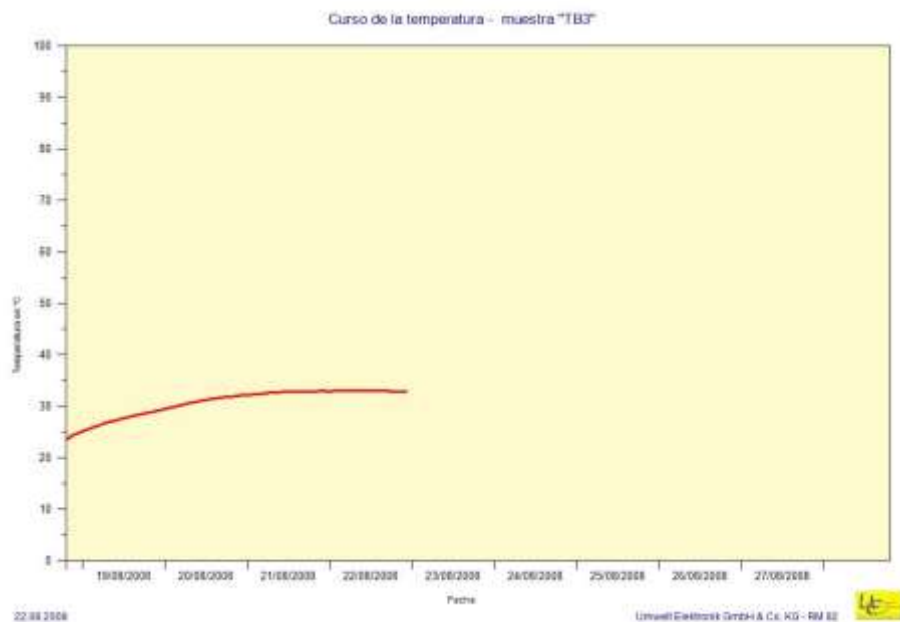
Gráfica 22. Prueba de estabilidad tratamiento TB1



Gráfica 23. Prueba de estabilidad tratamiento TB2



Gráfica 24. Prueba de estabilidad tratamiento TB3



Apéndice H. Ubicación Detallada Planta de compostaje UIS



Figura 9. Mapa Campus UIS Sede principal con la planta de compostaje



Figura 10. Planta de compostaje

Apéndice I. Dimensionamiento planta de compostaje



Figura 9. Dimensionamiento planta compostaje



Figura 10. Ubicación zonas planta

Donde:

1. Entrada/Salida
2. Zona de recepción/almacenamiento del material
3. Zona donde se desarrolla el proceso (Zona de descomposición, maduración, laboratorio y almacenamiento final)

Apéndice J. Resultados de laboratorio

RESULTADOS INICIALES

Informe de resultados No. I-19-229	Fecha emisión: Abril 26 de 2019
Cliente: EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA	
Dirección del cliente: Escuela de ingeniería civil- UIS	
Solicitud de servicio No. 19-176	No. de muestras: 06
Fecha de recepción de muestras: Abril 08 de 2019	
Muestras recibidas por: Amparo López	
Fecha de análisis: Abril 08 de 2019 – Abril 25 de 2019	

PARAMETRO	RV	RANP	RAP	MEZCLA INICIAL
				RV+RANP+RAP+AS+
				RF
	RESULTADO	RESULTADO	RESULTADO	RESULTADO
	O	O	O	
pH (Unidades de pH)	7.64	4.3	4.16	5.68
Humedad (%)	36.34	86.81	68.81	45.47
Carbono orgánico total oxidable (%C)	3.5	3.1	5.3	3.6
Nitrógeno total (%N)	1.19	1.3	1.05	1.12
Potasio (%K ₂ O)	0.53	0.42	0.15	0.25

PARAMETRO	RV	RANP	RAP	MEZCLA INICIAL
				RV+RANP+RAP+AS+
				RF
	RESULTAD	RESULTAD	RESULTAD	RESULTADO
	O	O	O	
Fósforo total (%P ₂ O ₅)	0.31	0.14	0.1	0.89

RESULTADOS FINALES

Informe de resultados No. I-19-469	Fecha emisión: Julio 10 de 2019
Cliente: EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA	
Dirección del cliente: Escuela de ingeniería civil- UIS	
Solicitud de servicio No. 19-314	No. de muestras: 06
Fecha de recepción de muestras: Junio 18 de 2019	
Muestras recibidas por: Amparo López	
Fecha de análisis: Junio 18 de 2019 - Julio 09 de 2019	

Tratamiento TA

<i>PARAMETRO</i>	<i>TA</i>		
	<i>TA1</i>	<i>TA2</i>	<i>TA3</i>
	<i>RESULTADO</i>	<i>RESULTADO</i>	<i>RESULTADO</i>
pH (Unidades de pH)	8.45	8.35	8
Humedad (%)	44.9	48.03	42.02
Conductividad (mS/cm)	2761	2270	2852
Cenizas (%)	28.5	26.2	28
Carbono orgánico total oxidable (%C)	10.89	9.89	13.86
Nitrógeno total (%N)	1.16	1.16	1.1
Potasio (%K ₂ O)	0.76	0.52	0.57
Fósforo total (%P ₂ O ₅)	5.11	1.98	2.3
Sólidos volátiles	25.1	22.7	24.9

Tratamiento TB

<i>PARAMETRO</i>	<i>TB</i>		
	<i>TB1</i>	<i>TB2</i>	<i>TB3</i>
	<i>RESULTADO</i>	<i>RESULTADO</i>	<i>RESULTADO</i>
pH (Unidades de pH)	8.36	8.27	8.16
Humedad (%)	42.13	43.21	42.89
Conductividad (mS/cm)	2180	2137	2263
Cenizas (%)	30.18	27.8	25.22
Carbono orgánico total oxidable (%C)	10.42	11.77	18.93
Nitrógeno total (%N)	1.06	1.1	1.03
Potasio (%K ₂ O)	0.61	0.55	0.48
Fósforo total (%P ₂ O ₅)	2.92	2.99	2.77
Sólidos volátiles	27.3	24.3	21.6