

**Evaluación de la aplicación de estrategias operativas en el mejoramiento y optimización
del proceso del compostaje de residuos verdes**

Arley Yesid Calderón Ferreira

Juan Camilo Medina Ardila

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Doctor en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Marco de referencia	14
1.1 Definición de compostaje	14
1.2 Etapas del proceso de compostaje.....	14
1.2.1 Actividad microbiana durante las fases del compostaje.	16
1.3 Agentes partícipes en el proceso del compostaje.....	17
1.3.1 Microorganismos.	17
1.3.2 Carbono y nitrógeno.	17
1.3.3 Humedad.....	18
1.3.4 Aireación y concentración de oxígeno.....	18
1.4 Compostaje de residuos verdes	19
1.5 Compostaje en dos etapas	19
2. Metodología	20
2.1 Fase 1. Selección de las estrategias operativas a evaluar en el proceso	20
2.1.1 Selección de estrategias.	21
2.1.2 Selección de estrategia operativa.....	22
2.1.3 Tratamientos utilizados.	23

2.2 Fase 2. Montaje y monitoreo del proceso de las estrategias operativas planteadas.....	24
2.2.1 Montaje	24
2.2.2 Monitoreo.....	25
2.2.3 Pruebas de germinación.	25
3. Resultados y discusión.....	26
3.1 Análisis fisicoquímico de los RV.	26
3.2 Caracterización de los sustratos y tratamientos	27
3.3 Comportamiento de la temperatura.....	29
3.4 Comportamiento del pH.....	34
3.5 Pruebas de germinación	35
3.6. Humedad	36
3.7 Conductividad eléctrica	37
4. Conclusiones.....	37
Referencias bibliográficas.....	40
Apéndices.....	46

Lista de ilustraciones

	Pág.
<i>Ilustración 1.</i> Variación de la temperatura y pH durante el proceso de compostaje Adaptada de Golueke 1991	16
<i>Ilustración 2.</i> Comportamiento de la temperatura en las pilas del tratamiento T1	30
<i>Ilustración 3.</i> Comportamiento de la temperatura en las pilas del tratamiento T2.....	30
<i>Ilustración 4.</i> Comportamiento de la temperatura en las pilas del tratamiento T3.....	31
<i>Ilustración 5.</i> Comparación de los resultados de la prueba de germinación.	36

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Composición seleccionada para los tratamientos</i>	22
Tabla 2. <i>Tratamientos escogidos</i>	23
Tabla 3. <i>Rangos de valores de cada propiedad fisicoquímicas de los RV</i>	26
Tabla 4. <i>Caracterización fisicoquímica de los sustratos</i>	28
Tabla 5. <i>Resumen del comportamiento de las temperaturas en los tres tratamientos</i>	31

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Valores de interés del aserrín.....	46
Apéndice B. Procedimiento para calcular la relación C:N teórica	47
Apéndice C. Información de interés de los sustratos	49
Apéndice D. Cajones de confinamiento.....	50
Apéndice E. Caracterización de los residuos verdes	51
Apéndice F. Disposición de las pilas en el área experimental.....	53
Apéndice G. Equipo utilizado y muestreo.	54
Apéndice H. Pruebas de germinación.....	56
Apéndice I. Informe de resultados del análisis fisicoquímico de los sustratos.....	57
Apéndice J. Comportamiento del pH de los tratamientos.....	65

Resumen

Título: Evaluación de la aplicación de estrategias operativas en el mejoramiento y optimización del proceso del compostaje de residuos verdes*

Autores: Arley Yesid Calderón Ferreira**
Juan Camilo Medina Ardila

Palabras clave: Residuos verdes, compostaje de dos etapas, residuos de alimentos.

Descripción

El compostaje de los residuos verdes constituye una estrategia para el desarrollo sostenible de la sociedad moderna, por tal motivo, y debido a su lenta descomposición, causada principalmente por su heterogeneidad y por el alto contenido de material de difícil degradación como los compuestos lignocelulósicos, en el presente proyecto se propuso y evaluó una estrategia operativa, para analizar su efecto en el proceso de compostaje. Las estrategias propuestas consideran: i) compostaje en dos etapas, ii) adición de materiales complementarios como residuos de alimentos crudos y procesados, iii) adición de roca fosfórica. Para tal efecto, se plantearon tres tratamientos con el fin de mejorar el proceso de compostaje de los residuos verdes: tratamiento 1 compuesto por residuos verdes (RV), residuos de alimentos crudos y procesados, aserrín y roca fosfórica haciendo uso de un proceso de compostaje de dos etapas; tratamiento 2 con igual composición a la del tratamiento 1 mediante un compostaje tradicional, es decir, una sola etapa y finalmente el tratamiento 3 cuya composición difiere con la del tratamiento 2 en la adición de roca fosfórica; los anteriores tratamientos fueron compuestos por 48% de residuos verdes, 21% de residuos de alimentos crudos, 18% de residuos de alimentos procesados y 13% de aserrín en conjunto con la adición de roca fosfórica en base al 15% del peso total de la pilas; los resultados indican que el tratamiento 1 ofrece un mejor proceso de compostaje a pesar de no exponer el comportamiento de temperatura ideal observado en la literatura, evidenciándose que la aplicación de la fuente de fósforo externa propicia en gran medida la germinación de las plantas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Abstract

Title: Evaluation of the application of operational strategies in the improvement and optimization of the green waste composting process*

Authors: Arley Yesid Calderón Ferreira**
Juan Camilo Medina Ardila

Keywords: Green waste, composting, two-stage composting, food waste.

Description

Composting of green waste is a strategy for sustainable development of modern society. For this reason, and due to its slow decomposition, caused mainly by its heterogeneity and by the high content of difficult degradation material such as lignocellulosic compounds, in this project, an operational strategy was proposed and evaluated, to analyze its effect on the composting process. The proposed strategies consider: i) two-stage composting, ii) addition of complementary materials such as raw and processed food waste, iii) addition of phosphate rock. For this purpose, three treatments were proposed in order to improve the composting process of green waste: treatment 1 composed of green waste (RV), raw and processed food waste, sawdust and phosphate rock making use of a composting process of two stages; treatment 2 with the same composition as that of treatment 1 by means of a traditional composting, that is to say, a single stage and finally treatment 3 whose composition differs from that of treatment 2 at the addition of phosphate rock; the above treatments were composed of 48% green waste, 21% raw food waste, 18% processed food waste and 13% sawdust in conjunction with the addition of phosphate rock based on 15% of the total weight of the waste piles; concluding that treatment 1 offers a better composting process despite not exposing the ideal temperature behavior observed in the literature, showing that the application of external phosphorus greatly promotes plant germination.

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor in Sanitary and Environmental Engineering

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) en la revisión del 2015 sobre las perspectivas de la población mundial, proyectó que para las próximas décadas, el planeta contará con más de 10000 millones de habitantes (Elcacho, 2016); incremento significativo no proporcional al aumento de los recursos que serán requeridos por esta población; por ende se hace imprescindible un desarrollo sostenible que posea un correcto manejo y una adecuada gestión de los residuos sólidos municipales (RSM).

Entre los RSM, se encuentran en una alta proporción los residuos verdes (RV), los cuales están compuestos por los desechos del mantenimiento regular de los jardines, la tala de árboles y la siega de la hierba junto con la madera usada (Kabir et al, 2015). De acuerdo con algunos estudios, su proporción puede ser significativa, tal es el caso de Taiwán, en donde los RV constituyen entre el 22 y el 30% de los RSM (statistics, 2006), estudios de la agencia de protección ambiental de Estados Unidos, encontraron que en el año 2007 fueron producidos 230 millones de toneladas de RSM, de las cuales el 13% correspondía a los RV (Levis et al, 2010).

Una opción viable para el manejo de los RV es la aplicación del compostaje, presentándose como una alternativa de transformación con el fin de permitir la recuperación de los recursos naturales y conservar su equilibrio (Ríos, 1997). En países como los Estados Unidos, la industria del compostaje ha crecido en gran medida durante las últimas 4 décadas, allí las plantas de compostaje de RV recuperaron 19 millones de toneladas en el 2007, presentando un 64.1% de los residuos generados (Levis et al, 2010). Asimismo, la Unión Europea se presenta como ejemplo de la práctica de compostaje al contar con más de 2500 plantas de compostaje en 18

países, procesando alrededor de 11 millones de toneladas anuales de residuos sólidos orgánicos (Romero Paredes, 2013).

Una de las principales dificultades para el compostaje de los RV, es la difícil transformación asociada a la presencia de compuestos lignocelulósicos junto a la alta heterogeneidad de los materiales, puesto que para las biomásas que tiene un alto contenido de lignocelulosa, el compostaje requiere mucho tiempo produciendo gases olorosos como el amoníaco y el ácido sulfhídrico, generando finalmente un producto de baja calidad no apto para uso comercial (Gabhane et al, 2012).

Diferentes estrategias han sido empleadas para la optimización del compostaje de RV, tal es el caso de la adición de bagazo de caña de azúcar y de pasto estrella (Oviedo et al, 2015), aserrín seguido de bagazo de caña de azúcar, cáscara de huevo y virutas de madera (Li et al, 2013), residuos de trigo y picado de heno (Adhikari et al, 2008) y papel cartón (Francou et al, 2008). No obstante, las anteriores propuestas no han sido abordadas con los residuos verdes del contexto local, es decir, especies vegetales nativas y su respectiva composición fisicoquímica.

Por tal razón en el presente proyecto se consultaron estrategias con potencial de aplicación en el contexto de países en desarrollo, haciendo uso de materiales presentes en el campus de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y en la región, evaluando el efecto de la aplicación de dichas estrategias en el procedimiento del compostaje de RV.

1. Marco de referencia

1.1 Definición de compostaje

El compostaje es hoy en día un método general para tratar los RSM (Tuomela et al, 2000), siendo una técnica eficaz para transformar los desechos orgánicos en un recurso útil para mejorar las características del suelo y desempeñar un papel significativo en la reducción de los gases de efecto invernadero debido a su alto contenido en materia orgánica estable (Favonio & Hogg, 2008).

1.2 Etapas del proceso de compostaje

En condiciones óptimas, el compostaje se desarrolla a través de cuatro fases, la fase mesofílica, la fase termofílica que puede durar de unos días a varios meses, la fase de enfriamiento y finalmente la fase de maduración cuya duración es de varios meses (Golueke, 1991).

La duración de las fases de compostaje depende de la naturaleza de la materia orgánica que se está compostando y de la eficiencia del proceso, que está determinada por el grado de aireación y agitación. En la fase mesofílica la masa está a temperatura ambiente y generalmente ligeramente ácida; fuentes de carbono solubles y fácilmente degradables, tales como monosacáridos, almidón y lípidos, son utilizados por los microorganismos en ésta etapa temprana, disminuyéndose el pH al formarse ácidos orgánicos. (Román et al, 2013)

En la etapa termofílica, los microorganismos comienzan a degradar las proteínas, dando como resultado la liberación de amonio y un aumento del pH; una vez consumido las fuentes de carbono fácilmente degradables, los compuestos más resistentes tales como celulosa, hemicelulosa y lignina se degradan y parcialmente se transforman en humus (Crawford, 1983); en la etapa termofílica se lleva a cabo la higienización del compost, siendo de vital importancia puesto que uno de los problemas del uso del compost está relacionado con la posibilidad de contener bacterias patógenas como la *Salmonella* spp y la *Escherichia coli* (Islam et al, 2015) (Lasaridi et al, 2006), así como la *Listeria monocytogenes* (Oliveira et al, 2011), y huevos de parásitos que pueden llegar a las personas por medio del consumo de vegetales y frutas contaminadas (Román et al, 2013).

Posteriormente la temperatura desciende hasta llegar a ser igual a la temperatura ambiente, proceso que puede tardar varios meses y durante los cuales tienen lugar reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados, generando la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román et al, 2013). Para representar de mejor manera el comportamiento de la temperatura y del pH a lo largo del proceso del compostaje se hace uso de la Ilustración 1.

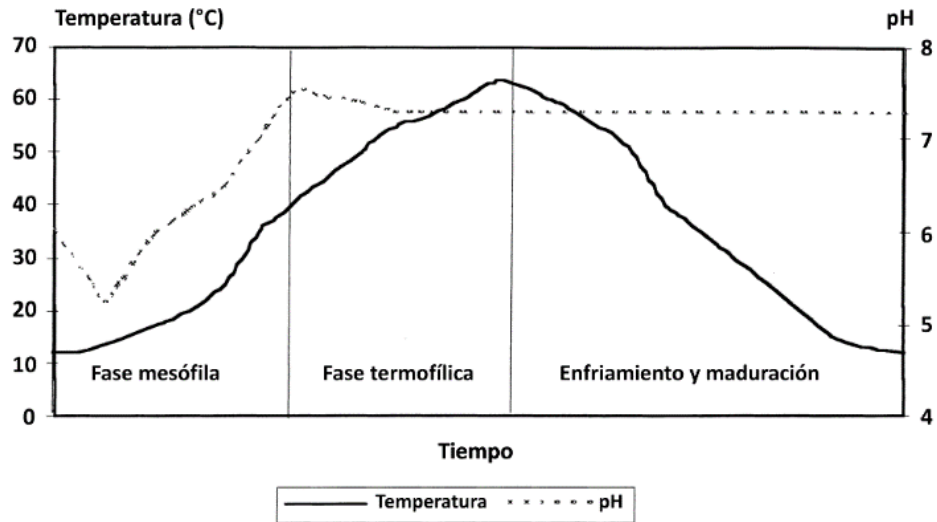


Ilustración 1. Variación de la temperatura y pH durante el proceso de compostaje Adaptada de Golueke 1991

1.2.1 Actividad microbiana durante las fases del compostaje. Aunque el número total de microorganismos no cambia significativamente durante el compostaje, la diversidad microbiana puede variar durante las distintas fases del compostaje (Atkinson et al, 1996), en donde la naturaleza de la sucesión y el número de microorganismos en cada fase de compostaje depende del sustrato y de los microorganismos precedentes en la sucesión (Crawford, 1983).

Al principio del compostaje predominan las bacterias mesófilas, pero después de que la temperatura aumenta a más de 45 ° C, las bacterias termófilas se apoderan y los hongos termófilos también aparecen en el compost; una vez la temperatura supera los 60 ° C, la actividad microbiana disminuye drásticamente, pero después de que el compost se haya enfriado, las bacterias mesófilas y los actinomicetos vuelven a dominar (McKinley, 1985) (Strom, 1985).

1.3 Agentes partícipes en el proceso del compostaje

1.3.1 **Microorganismos.** Durante el compostaje, los microorganismos tienen la función de transformar la materia orgánica en CO₂, biomasa, calor y un producto final similar al humus; dicha función depende de su capacidad para producir las enzimas necesarias para la degradación del sustrato, requiriendo un completo y más extenso sistema enzimático cuando el sustrato es de más difícil degradación (Tuomela et al, 2000). De esta manera, a través de la acción de los microorganismos, los compuestos orgánicos complejos tales como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (Crawford, 1983) se degradan a moléculas más pequeñas que pueden ser utilizadas por las células microbianas (Golueke, 1991) (Golueke, 1992).

1.3.2 **Carbono y nitrógeno.** Los microorganismos requieren una fuente de carbono, macronutrientes tales como el nitrógeno, fósforo y potasio, y ciertos oligoelementos para su crecimiento; sirviendo en primera medida el carbono como una fuente de energía para los microorganismos, mientras que una pequeña fracción del mismo se incorpora en sus células; de ésta manera parte de la energía formada se utiliza para el metabolismo microbiano, y el resto se libera como calor (Tuomela et al, 2000).

Asimismo, el nitrógeno juega un papel importante en el proceso del compostaje al ser un elemento crítico para los microorganismos puesto que es un componente necesario para el crecimiento y el funcionamiento de las células; en estos términos, si el nitrógeno es un factor limitante durante el compostaje, el proceso de degradación será lento. De manera opuesta, si hay exceso de nitrógeno, a menudo se pierde del sistema como gas de amoníaco u otros compuestos de nitrógeno. La relación de carbono a nitrógeno (C : N) es uno de los factores importantes que

afectan el proceso de compostaje, así como las propiedades del producto final (Zhu, 2007) (Chang & Hsu, 2008); estudios del año 1991 recomiendan una relación C : N de entre 25-40 variando dicho valor según el sustrato (Golueke, 1991); estudios más recientes, del año 2007, han demostrado que es recomendable una relación C :N con valores entre 25 y 30, así como en base a otros estudios se concluyó que es posible llevar a cabo el proceso de efectivamente a un menor relación C : N de 15 (Huang et al, 2004) (Zhu, 2007).

1.3.3 Humedad. El contenido de humedad de la mezcla de compostaje proporciona un medio para el transporte de los nutrientes disueltos necesarios para las actividades metabólicas y fisiológicas de los microorganismos, si el contenido de humedad cae por debajo de un nivel crítico, la actividad microbiana disminuirá, produciendo una baja eficiencia de la degradación de la materia orgánica. Por otro lado, un contenido de humedad demasiado alto puede producir una condición anaerobia, causar la lixiviación de los nutrientes, disminuir la tasa de descomposición y generar malos olores. Según Tiquia (1996) y Liang (2003) para el buen desarrollo del proceso de compostaje se recomiendan humedades entre el 55% y 60% (Tiquia, 1996) (Liang, 2003)

1.3.4 Aireación y concentración de oxígeno. Siendo el compostaje un proceso aerobio (Atkinson, 1996), mediante la realización de volteos es imprescindible mantener los niveles oxígeno recomendados, los cuales pueden variar entre el 15 y 20% (Mac Gregor et al, 1981), para evitar que concentraciones menores produzcan en las pilas condiciones anaerobias.

1.4 Compostaje de residuos verdes

El compostaje es un método probado para el tratamiento tanto de RV como de residuos de alimentos (Lemus & Lau, 2002) (Nakasaki & Ohtaki, 2002), considerándose eficaz para reducir la masa de los RV, para desinfectar, y para transformarla en un producto rico en nutrientes útiles para las plantas y del suelo, con el principal reto de descomponer el material lignocelulósico, material integrante de los residuos verdes, ya que por lo general se descompone muy lentamente (Fernandez et al, 2014).

1.5 Compostaje en dos etapas

Para biomásas con alto contenido de lignocelulosa se ha determinado que el compost tradicional conlleva mucho tiempo, produciendo gases olorosos (es decir, NH_3 y H_2S), y genera un producto no apto para uso comercial (Gabhane et al, 2012).

Con base en esto, algunos investigadores han descrito una innovadora tecnología de compostaje de dos etapas que incluye un compostaje primario y un compostaje secundario (Zhang et al, 2013) dando lugar a dos picos en la temperatura (55- 60 C o incluso más) y un período termófilo más largo; generando como consecuencia un mejor producto y en un tiempo más corto que el compostaje tradicional (Zhang et al, 2013).

2. Metodología

Este estudio fue llevado a cabo en el campus de la UIS, Colombia, mediante el montaje de pruebas piloto, por medio de las cuales se analizó la influencia de algunas estrategias operativas, seleccionadas con el fin de optimizar la calidad del proceso de compostaje de RV. El proyecto se desarrolló en dos fases principales, en la primera de ellas se analizaron las propiedades fisicoquímicas de los RV y se seleccionaron las estrategias operativas a emplear, y en la segunda, dichas estrategias fueron implementadas.

2.1 Fase 1. Selección de las estrategias operativas a evaluar en el proceso

En primera instancia se realizó una revisión literaria de artículos científicos publicados a partir del año 2002, empleando palabras clave como “Green Waste” “composting” “Yard Waste” “Pruning Waste” en bases de datos como Sciencedirect, Scopus y Scielo; de esta manera, se estudió el potencial de transformación de los RV mediante un proceso de compostaje y se analizaron las estrategias que han sido utilizadas en otros contextos para mejorar la calidad de dicho proceso, principalmente mediante la adición de diferentes materiales y la puesta en marcha de diversas acciones operativas.

2.1.1 Selección de estrategias. Según las recomendaciones de Reyes Torres (2017) en su estudio del estado del arte sobre estrategias para optimizar el compostaje de residuos verdes, es aconsejable implementar más de 2 de las estrategias analizadas para reducir significativamente los tiempos requeridos para un proceso de compostaje, entre las recomendaciones descritas en su informe, se decidió implementar 3 de ellas, estas fueron: i) trituración previa del material, ii) Adición de materiales de enmienda que proporcionen nutrientes a los microorganismos, iii) Implementación de compostaje en 2 etapas con el fin de producir 2 picos de temperatura (Reyes Torres, 2017)

Se compararon 4 materiales de enmienda: pollinaza, bovinaza, residuos de alimentos crudos y residuos de alimentos procesados; se estudió la posibilidad de combinar más de 2 materiales de enmienda, de la siguiente manera: 50% de RV, 30% de residuos de alimentos no procesados y 20% de residuos de alimentos procesados, acorde con el trabajo realizado por Cruz y García (2016) con residuos de la universidad (Cruz & García, 2016)–(Oviedo, 2017), se analizaron variables como la disponibilidad de los materiales, su facilidad de transporte y el costo que acarrearía usar cada uno de ellos. Se decidió utilizar los residuos de alimentos crudos y procesados debido a la disposición de los mismos en el campus universitario, más la adición de aserrín, del cual se pudo observar gran aporte de carbono para regular la relación C:N (ver ANEXO A)

Tras estudiar diversas proporciones de los materiales, buscando ajustar teóricamente a un valor de 20 la relación C:N (Ver procedimiento en ANEXO B) se obtuvo como resultado la composición mostrada en la Tabla 1 (Los valores de las propiedades fisicoquímicas utilizadas se encuentran disponibles en el ANEXO C)

Tabla 1.

Composición seleccionada para los tratamientos

Material	Composición de la pila	Masa (Kg)
Residuos verdes	48%	96
Residuos alimentos crudos	21%	42
Residuos de alimentos procesados	18%	36
Aserrín	13%	26
Relación C/N de la mezcla	19.98	
Contenido de humedad de la mezcla (%)	44.47	

Por último, se decidió la incorporación de la roca fosfórica a los tratamientos dado al bajo contenido de fósforo en la mezcla, el cual limita la descomposición microbiana durante el compostaje (Zhang & Sun, 2017). De ésta manera, se adicionó 15% de roca fosfórica respecto al peso total de la pila (30 Kg por pila).

2.1.2 Selección de estrategia operativa. Se encontró un método de compostaje mejorado que incluye una fermentación primaria y una fermentación secundaria (Zhang et al, 2013). En este nuevo método, la temperatura de la fase termofílica se consigue dos veces y el tiempo requerido para la producción de un compost maduro se reduce sustancialmente (Zhang & Xiangyang, 2015).

Zhan y Xianggyan (2017) utilizaron un sistema de confinamiento con digestores de concreto para obtener un compostaje de dos etapas. Para el presente estudio, se diseñaron cajones de confinamiento buscando obtener este mismo resultado. Sus dimensiones fueron 1.3m de largo, 0.55m de ancho y 1.25m de alto, se agregaron en los paneles de menores dimensiones 8 (ocho)

orificios de 3cm de diámetro y en los de paneles de dimensiones mayores, 12 orificios de 5cm de diámetro ubicados equidistantemente con el fin de permitir una correcta aireación. También se construyeron de manera que pudieran desarmarse fácilmente para permitir la humectación y el volteo de los materiales (Ver ANEXO D).

2.1.3 Tratamientos utilizados. Los tratamientos seleccionados para realizar el estudio se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2.

Tratamientos escogidos

Tratamiento	Número de etapas	Descripción
T1	2 etapas	RV + PR + UPFW + PFW + SWD + Trituración
T2	Tradicional	RV + PR + UPFW + PFW + SWD + Trituración
T3	Tradicional	RV + UPFW + PFW + SWD + Trituración

Nota: RV. Resíduos verdes, PR. Roca fosfórica, UPFW. Resíduos de alimentos crudos, PFW. Resíduos de alimentos procesados, SWD. Aserrín

El tratamiento T1 y el T2 se conformaron con la misma proporción de materiales establecida en la Tabla 2 en conjunto con la trituración previa de los RV, estrategia que ha presentado optimización en el proceso de compostaje en diferentes artículos; de ésta manera, por medio de los tratamientos T1 y T2, se buscó estudiar la incidencia de la implementación de compostaje de dos etapas frente al compostaje tradicional. Asimismo, el tratamiento T3 se diferencia del T2 en el hecho de no contar con la adición de roca fosfórica permitiendo en éste caso el estudio de la influencia de una fuente de fósforo externa en el proceso del compostaje.

2.2 Fase 2. Montaje y monitoreo del proceso de las estrategias operativas planteadas

2.2.1 Montaje. Para realizar el montaje experimental, primero se recolectaron los materiales necesarios; tres días antes del montaje se reunieron los residuos de alimentos procesados y no procesados provenientes de la sección de comedores y cafetería adscrita a la división de bienestar universitario y de fruterías aledañas. Los RV fueron recogidos de trabajos de jardinería y mantenimiento de las zonas verdes de la Universidad, trabajos realizados la misma semana del montaje de las pilas, que se llevó a cabo el viernes 17 de noviembre del 2017. Este mismo día se realizó una caracterización de los RV con el fin de analizar su composición, para esto, fueron mezclados adecuadamente y se procedió a realizar el método de cuarteo, disponiendo el material en forma de pila cónica y dividiendo dicha pila en 4 partes iguales con el fin de tomar y unir dos partes opuestas que fueron mezcladas y unidas de nuevo en forma de pila circular que al igual que la anterior fue dividida en 4 partes y de la cual también se tomaron 2 partes opuestas para conformar otra pila, esto se repitió hasta llegar a un peso de 25kg. (Ver ANEXO E)

Posterior a esto, los residuos fueron triturados de forma manual mediante el uso de un machete a un tamaño de partícula de aproximadamente de 7 cm (posteriormente, a las dos semanas, se redujo el tamaño de partícula a aproximadamente 3 cm mediante el uso de tijeras de poda) para luego mezclar todos los materiales correspondientes de cada pila; cada tratamiento se montó por triplicado. Las 3 pilas del tratamiento T1 fueron dispuestas en los cajones de confinamiento, quedando con una altura aproximada de 0.95m y las pilas del tratamiento T2 y T3 fueron dispuestas de forma cónica con una altura aproxima de 0.7 m. (La ubicación de las pilas se encuentra disponible en el ANEXO F).

2.2.2 Monitoreo. El monitoreo de las temperaturas se realizó 2 veces al día los primeros 22 días del proceso, a partir de esa fecha, fue medida diariamente; para esto se utilizó un termómetro digital K-Type thermocouple thermometer HI935005N que ofrece mediciones de temperatura de alta precisión ($\pm 0.2\%$) usando una sonda K-type thermocouple probe HI766TR1. Pruebas de pH y conductividad eléctrica se realizaron mínimo una vez por semana, para las cuales se preparó una solución acuosa de 10 gramos de muestra en 50 ml de agua destilada y se utilizó un pH-metro sensION™+ MM374. Semanalmente se realizaron volteos manuales y humectaciones a las pilas y se llevó el control de la humedad usando un medidor Ohaus MB-25. (Imágenes de los equipos usados y del proceso de monitoreo pueden observarse en el ANEXO G)

2.2.3 Pruebas de germinación. El índice de germinación que combina el conteo de la germinación de las semillas relativa y la elongación relativa de la raíz se ha utilizado ampliamente para evaluar la fitotoxicidad y también la madurez del compost (Zucconi et al, 1981) (Bernal et al, 1998) (Wong et al, 2001). Por tal razón y con base en la Norma Chilena Oficial de Compost (INN, 2004), se hace uso de bioensayos con semillas de rábano con el fin de calcular el porcentaje de germinación de las pilas de compost de los tratamientos T1, T2 y T3 en relación con una prueba control o testigo con agua destilada.

Fueron necesarias 30 cajas Petri, utilizando 3 para cada pila, a las cuales se colocó papel filtro y se agregaron 10 semillas de rábano. Se preparó una mezcla de material con agua destilada en una proporción 1:5, se dejó reposar durante 3 horas, luego se filtró y se agregó 4 ml del líquido filtrado a cada caja, las cuales se dejaron a temperatura ambiente (25°C Aproximadamente) durante 72 horas. (Ver ANEXO H)

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis fisicoquímico de los RV.

El compostaje se considera eficaz para el tratamiento de los RV transformándolos en un producto rico en nutrientes y útil para las plantas y el suelo (Zhan & Xianggyang, 2017); sin embargo, la distinta procedencia de los materiales y condiciones asociadas al medio ambiente como el estado del clima, hace que estos posean una gran variabilidad en su composición física, generando gran heterogeneidad de sus propiedades fisicoquímicas (Reyes Torres, 2017) (Vandecasteele, Boogaerts, & Vandaele, 2016) lo que a la vez, hace más complejo la determinación correcta de las tasas de aplicación apropiadas (Bary, 2005). Reyes Torres (2017), en su investigación para la construcción del estado del arte sobre estrategias para optimizar el compostaje de RV, presentó una tabla que contiene los rangos más importantes de las propiedades fisicoquímicas que ejercen mayor influencia en un proceso de compostaje, la tabla se muestra a continuación.

Tabla 3.

Rangos de valores de cada propiedad fisicoquímicas de los RV

Propiedad ¹	Rango de valores encontrado en la revisión
Tamaño de partícula predominante [mm]	10 – 30
Contenido de humedad [%]	40 – 55

Tabla 3. *Continuación*

Propiedad ¹	Rango de valores encontrado en la revisión
pH	6.5 – 7.5
Relación C/N	20 – 25
C [%]	40 – 50
N total [%]	0.9 – 1.2
P total [%]	0.1 – 0.2
K total [%]	0.4 – 0.8

Nota. ¹Todos los porcentajes son basados en peso seco de RV. Fuente: Adaptado de Reyes Torres, Marcela. (2017). Pasantía de investigación para la construcción del estado del arte sobre estrategias para optimizar el compostaje de residuos verdes

3.2 Caracterización de los sustratos y tratamientos

La Tabla 4 presenta información de los sustratos empleados en este proyecto, así como las mezclas propuestas en los tres tratamientos. Los resultados correspondientes al aserrín se han tomado de Hernández (2017) debido a que se contó con el mismo proveedor de dicho material. (El informe de resultados presentado por el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander, se encuentra disponible en el ANEXO I)

Tabla 4.

Caracterización fisicoquímica de los sustratos

Parámetro	Resultados						
	Roca Fosfórica	Residuos Verdes	Alimentos Crudos	Alimentos Procesados	Aserrín	T1,T2	T3
pH (Unidades de pH)	2.27	7.32	6.57	3.95	6.10	7.17	7.23
Humedad (%)	0.68	59.05	86.42	67.49	11.21	42.05	60.46
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	0.01	15.34	12.44	22.82	23.64	23.68	24.41
Nitrógeno Total (%N)	0.10	0.89	0.50	0.40	0.42	0.48	0.77
Cenizas (%)	98.95	76.65	11.27	3.29	3.84	39.36	20.22
Potasio (%K ₂ O)	0.14	0.37	5.08	0.80	0.28	1.40	0.38
Fósforo Total (%P ₂ O ₅)	5.77	0.63	0.96	0.43	4.09	1.47	0.59
Conductividad (µs/Cm)	206.20	452.00	1508.00	1996.00	211.40	367.00	509.00
C/N	0.10	17.23	24.89	57.06	56.29	49.32	31.70

Nota: La anterior información es presentada en base seca.

Se evidencia que los residuos de alimentos crudos poseen una relación C/N situada dentro del rango de valores recomendados, mientras que los alimentos procesados presentan una alta relación a la par que los residuos verdes (Golueke, 1991); en éstos términos cabe destacar que el aserrín posee, entre todos los sustratos aplicados, la mayor relación C/N tal como se consigna en la Tabla 4. Se presenta también una diferencia significativa entre las relaciones C/N del tratamiento T2 y T3, tratamientos cuya composición únicamente difieren en la adición de roca fosfórica en el tratamiento T2; material con el menor porcentaje de humedad, lo cual se ve reflejado en la también significativa diferencia de humedades de ambos tratamientos, específicamente de 42.05% en T2 y 60.46% en T3. También puede atribuirse la diferencia de

porcentaje de humedad al hecho de que el contenido de humedad de los alimentos varía enormemente puesto que el agua es un constituyente principal en la mayoría de los productos alimenticios.

También se evidencia el alto contenido de cenizas en la roca fosfórica, lo cual, según la literatura (Fernández-Delgado, 2015) (Kurola, 2011) a pesar de los efectos de mejora en suelo ácido debido a su efecto de encalado, el uso de cenizas ha presentado la desventaja de generar dilución de nitrógeno, lo cual afectaría al porcentaje de nitrógeno total de los tratamientos T1 y T2.

En términos de fósforo se evidencia que la roca fosfórica es el principal proveedor de dicho elemento, hecho que repercute en el mayor porcentaje de fósforo total de los tratamientos T1 y T2 en comparación con el tratamiento T3, asimismo los tratamientos T1 y T2 presentan mayor concentración de potasio que el tratamiento T3; por lo cual resulta recomendable el uso de una fuente de fósforo externa tal como lo fue la roca fosfórica.

3.3 Comportamiento de la temperatura

Las ilustraciones 1 a 3 presentan el comportamiento de la temperatura en los tratamientos 1, 2 y 3.

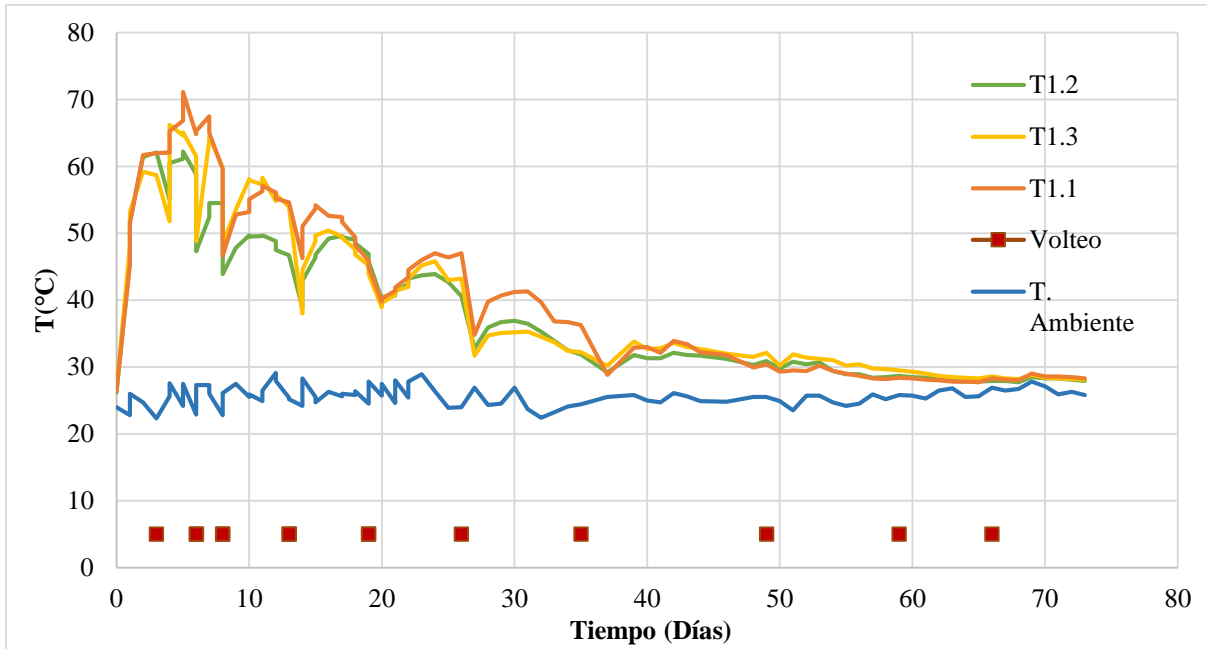


Ilustración 2. Comportamiento de la temperatura en las pilas del tratamiento T1

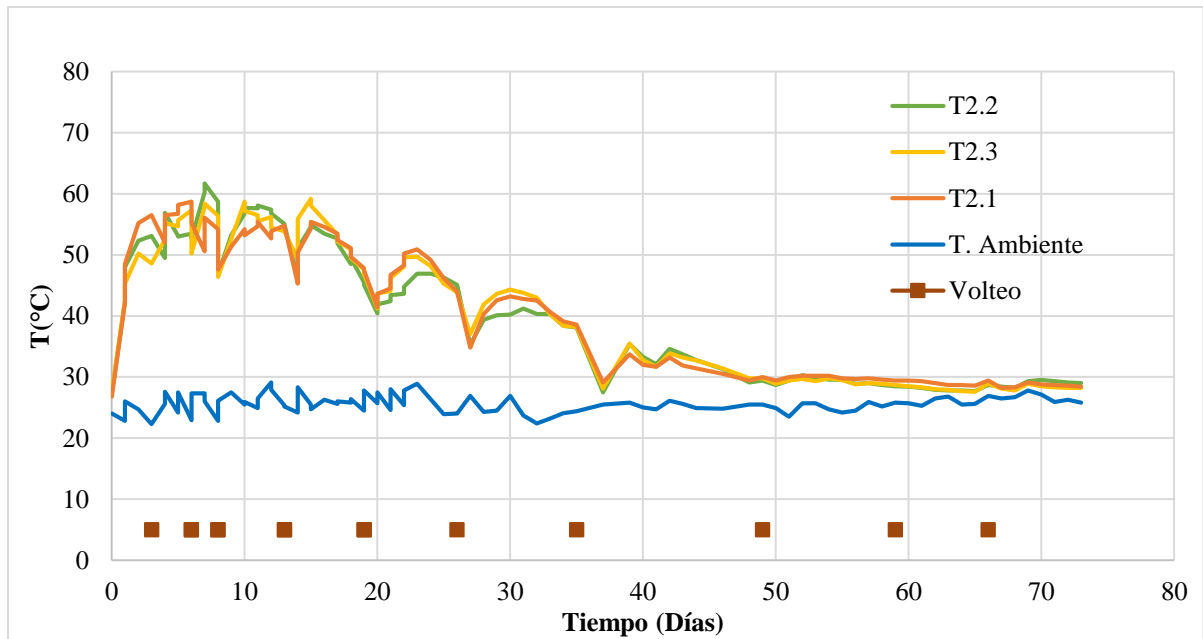


Ilustración 3. Comportamiento de la temperatura en las pilas del tratamiento T2

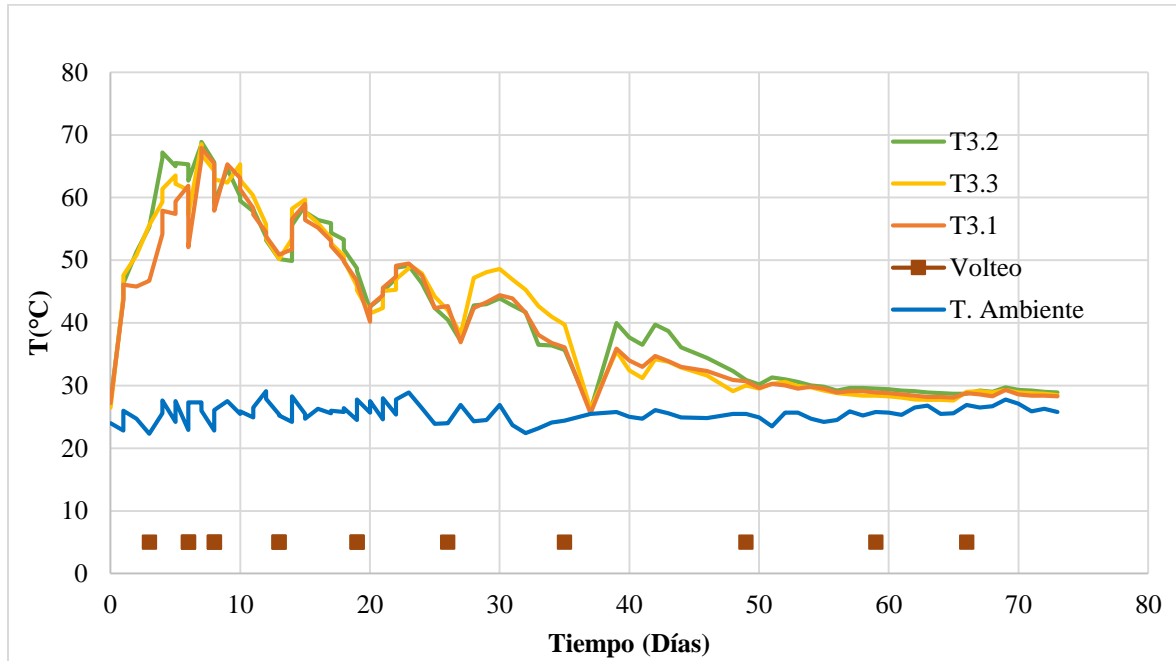


Ilustración 4. Comportamiento de la temperatura en las pilas del tratamiento T3

La tabla 5 presenta el comportamiento de las temperaturas en todas las pilas.

Tabla 5.

Resumen del comportamiento de las temperaturas en los tres tratamientos

Pila	Agua adicionada (L)	pH inicial	Tiempo en que inició la fase termofílica (días)	Temperatura máxima (°C)	Tiempo requerido para obtener la temperatura máxima (días)	Duración de la fase termofílica (días)	Tiempo* requerido para alcanzar Tamb+3°C (días)
T1.1	104.5	5.72	1	71.1	5	26	57
T1.2	104.5	5.72	1	62.2	5	24	57
T1.3	101	5.72	1	65.1	5	24	62
T2.1	111.5	5.72	2	58.7	6	26	62

Tabla 5. *Continuación*

Pila	Agua adicionada (L)	pH inicial	Tiempo en que inició la fase termofílica (días)	Temperatura máxima (°C)	Tiempo requerido para obtener la temperatura máxima (días)	Duración de la fase termofílica (días)	Tiempo* requerido para alcanzar Tamb+3°C (días)
T2.2	115	5.72	2	61.7	7	26	59
T2.3	122	5.72	2	58.4	7	30	59
T3.1	80	5.6	2	67.9	7	31	59
T3.2	80	5.6	2	68.9	7	30	62
T3.3	80	5.6	2	68.5	7	32	57

Nota. * Desde el inicio del proceso de compostaje (día cero)

Se observa que en todos los tratamientos se produce de forma satisfactoria la etapa mesofílica, tal como sucedería en un proceso de compostaje convencional descrito por Román(2013), donde dicha etapa comienza con temperatura ambiente y finaliza cuando el compost alcanza los 45 °C; de ésta manera la duración de la etapa mesofílica fue de 2 días para las pilas de los tratamientos T2 y T3, y de sólo 1 día para las pilas del tratamiento T1; debiéndose ésta menor duración al sistema de confinamiento utilizado en el tratamiento T1, por medio del cual se propician mayores temperaturas demostrado así en el alcance de los 45°C al primer día.

En la fase termofílica, producida cuando el material supera los 45 °C, se mantiene una alta actividad microbiana que, al utilizar las fuentes sencillas de C y N, generan calor y el consecuente aumento de temperatura llegando a obtener el máximo pico de temperatura de 71.1 °C, 62.2 °C y de 65.1 °C en las pilas T1.1, T1.2 y T1.3 respectivamente, todos los picos en el día cinco del proceso; para el tratamiento T2 se presentaron máximas temperaturas del valor de 58.7 °C en el día 6, 61.7 °C en el día 7 y 58.4°C en el día 7 en las pilas T2.1, T2.2 y T2.3

respectivamente y finalmente en el tratamiento T3 se presentaron picos en la temperatura de 67.9 °C, 68.9 °C y 68.5 °C en las pilas T3.1, T3.2 y T3.3 respectivamente, todos los picos en el día 7; en términos de la fase termófila se puede apreciar también la duración del rango termofílico, siendo de 26 días, 24 días, y 24 días para las pilas del tratamiento T1; de 26 días, 26 días y 30 días para las pilas del tratamiento T2 y de 31 días, 30 días y 32 días para las pilas del tratamiento T3; periodo en el cual se lleva a cabo la degradación de fuentes más complejas de C, como lo es la lignina y la celulosa.

Debido a las elevadas temperaturas alcanzadas durante la etapa termofílica, se destruyen las bacterias patógenas y parásitos presentes en los sustratos utilizados, siendo de gran importancia para permitir un compost higienizado (Román et al, 2013). De ésta manera se obtiene una mayor higienización en los tratamientos T1 y T3 cuyas máximas temperaturas son superiores a las del tratamiento T2. También se observa que el tratamiento T3 presenta una mayor duración termofílica, traduciéndose en una buena higienización aunque se debe tener en cuenta que en el caso de la pila T1.1, la cual alcanza una máxima temperatura de 71.1 °C, se tuvo una menor duración de la etapa termofílica debido a la alta temperatura alcanzada, claro indicativo de una mayor actividad microbiana, actividad microbiana potenciada posiblemente inicialmente por el sistema de confinamiento, razón por la cual presenta la mayor disminución de tiempo al contar con 26 días de fase termofílica y lograr una diferencia de 3 °C con la temperatura ambiente en 57 días.

La anterior información puede constatarse al observar las ilustraciones 1, 2 y 3 en donde se muestra que las mayores temperaturas se presentaron en el tratamiento T1 y T3 con un comportamiento muy similar, es decir, un pico notable de temperatura en la primera semana seguido de la paulatina disminución de temperatura; comportamiento que se diferencia del

tratamiento T2 en el hecho de que éste tratamiento no presentó un marcado pico de temperaturas en la primera semana sino que, en vez de un pico marcado en la primera semana, demostró temperaturas menores pero mucho más constantes, que los tratamiento T1 y T3, durante las dos primeras semanas.

Asimismo, se observa el claro comportamiento, en nuevamente todos los tratamientos, de la fase de enfriamiento en donde una vez agotadas las fuentes de carbono y especialmente el nitrógeno, las temperaturas descienden hasta los 40°C continuando la degradación de polímeros como la celulosa; comportamiento que se complementa con el comportamiento del pH el cual desciende levemente pero manteniéndose ligeramente alcalino; no pudiendo hablar aún de la fase de maduración, en la cual se producen reacciones secundarias estando el compost a temperatura ambiente.

3.4 Comportamiento del pH

Del comportamiento del pH a lo largo de los días del proceso (Ver ANEXO J) se puede evidenciar que en los tres tratamientos, se inicia con un valor de pH ácido tal como se espera en un proceso de compostaje convencional en donde en los primeros días del proceso, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos (Román et al, 2013); duración de fase ácida igual en todos los tratamientos debido principalmente a la igual composición de RV y residuos de alimentos, principales portadores de materia orgánica; en la fase termofílica, debido a la conversión del amonio en amoníaco, el pH sube convirtiéndose en alcalino para finalmente y con el paso del tiempo, estabilizarse en valores afines al neutro. Los máximos valores del pH fueron de 9.35, 9.29 y nuevamente 9.29 para los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente.

3.5 Pruebas de germinación

La fitotoxicidad se expone como uno de los principales criterios para la valoración de la suficiencia y capacidad de los materiales orgánicos para su uso agrícola (Albuquerque et al, 2005), y es una prueba fundamental en la evaluación del nivel de madurez en que se encuentra el compost.

En estos términos se puede evidenciar que para el día 57, todas las pilas salvo las pilas T1.3 y T2.3 presentaron índices de germinación superiores a 80%, lo cual, con base en la Norma Chilena es un indicativo de que el producto presenta características de madurez, la cual no se puede observar en las pilas T1.3 y T2.3 por lo que se puede afirmar que contienen sustancias fitotóxicas que aún no se han metabolizado por completo (Varnero et al, 2007). Para el día 64 del proceso, todas las pilas sobrepasan el 80% en los índices de germinación resaltando el notable incremento en las pilas del tratamiento T1 en primer medida y un aumento también significativo de las pilas del tratamiento T2; para el día 71 los índices de germinación mantienen el mismo comportamiento presentado en el día 64, indicando posiblemente que entre el día 64 y el día 71 no se presentó una metabolización significativa de las sustancias fitotóxicas presentes.

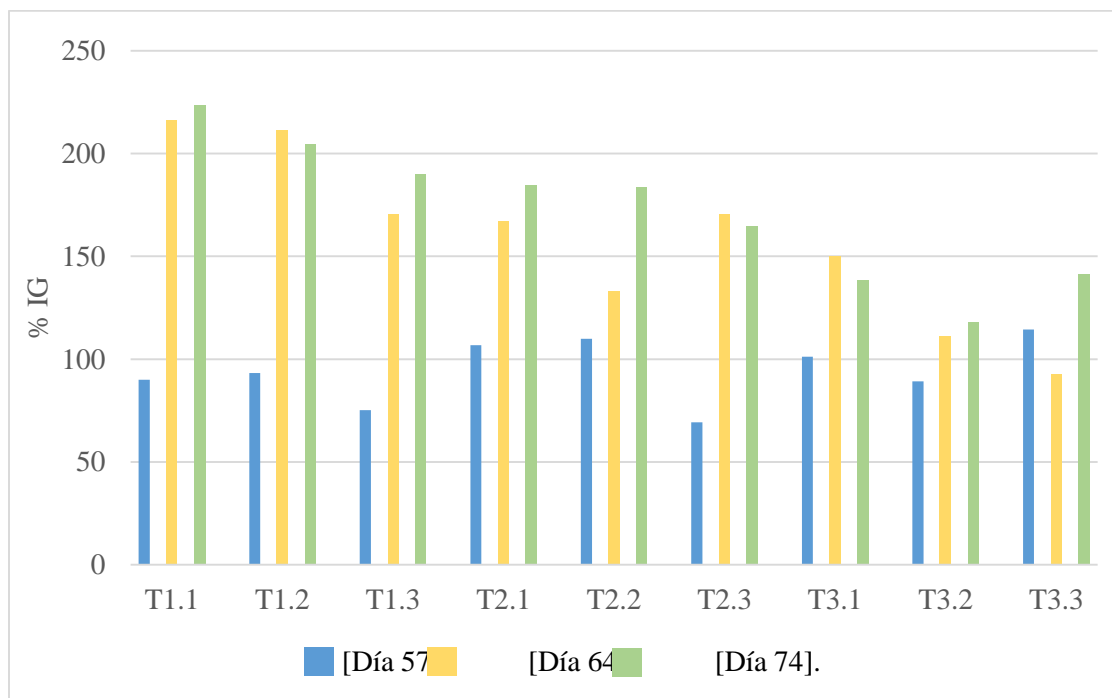


Ilustración 5. Comparación de los resultados de la prueba de germinación.

3.6 Humedad

El día cero del proceso, la humedad para los tratamientos T1 y T2 tuvo un valor de 46.7% mientras que T3 registró un valor de humedad inicial de 31.1%. Por esta razón, el día 3 del proceso, se realizó la primera humectación a las pilas, agregando 28 litros de agua potable a los tratamientos T1 y T2 y 35 litros a las pilas del tratamiento T3, buscando acercar estos valores a los considerados como óptimos por (Tiquia, 1996) y (Liang, 2003)

A lo largo del proceso, se garantizaron humedades a todos los tratamientos entre 40% y 60% lo que permite que la actividad de los microorganismos se desarrolle correctamente y evita que un exceso de agua llene los espacios en que el aire se deposita, robando de esta manera el oxígeno a las pilas. (Haug, 1993). Las pilas que requirieron una mayor humectación fueron las

del tratamiento T2; 111.5L para T2.1, 115L para T2.2 y 122L para T2.3, esto pudo ser ocasionado por una exposición al sol, que en horas de la tarde caía sobre ellas, para evitar que este problema siguiera presentándose fueron instalados unos tablonces de madera que no permitían dicha exposición. La cantidad total de agua adicionada a cada pila puede observarse en la Tabla 5.

3.7 Conductividad eléctrica

El día del montaje el valor de la conductividad eléctrica para los tratamientos T1 y T2 fue de 1.02 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que para el tratamiento T3 fue de 1.27 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A lo largo del proceso de compostaje el valor de la CE en los tratamientos osciló entre 0.3 y 1.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados no presentan inconvenientes, pues están muy por debajo de los valores que pueden inhibir el correcto desarrollo de la actividad biológica (3-5 mS/cm) y producir efectos fitotóxicos que afecten el crecimiento de las plantas si el compost es aplicado a un suelo (Hernandez, 2017)

4. Conclusiones

Los estudios analizados sobre los RV permiten establecer su potencial de transformación mediante un proceso de compostaje; por ejemplo, se puede afirmar que poseen una gran variabilidad en su composición fisicoquímica debido a sus diferentes procedencias y sus distintos tiempos de recolección; se encontró que poseen valores de humedad bajos, y es por esta razón,

que los RV son usados generalmente como material para dar soporte a otras mezclas de compostaje; la relación C:N que presentan los RV no es la recomendada para un buen desarrollo del proceso, se advirtió un gran contenido de carbono y bajos contenidos de nutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Se observó que estas características pueden ser mejoradas mediante la adición de materiales de enmienda lo que puede traducirse en menores tiempos de proceso. Por último los RV poseen grandes cantidades de materia orgánica que al tratarse funciona como fuente de energía y ayuda a satisfacer las necesidades de nutrientes de un suelo o un cultivo.

Respecto al tratamiento T1, tratamiento en el cual se hizo uso de un sistema de confinamiento con el fin de generar un proceso de compostaje de dos etapas, se determinó que no generó el comportamiento ideal y esperado, el cual se constituye en dos marcados picos de temperatura; esto debido principalmente a que el sistema de confinamiento carecía de suficiente aireación, razón por la cual se evidenciaron temperaturas superiores en los primeros días, causando que la actividad microbiana consumiese de ésta manera grandes cantidades de carbono y nitrógeno, cantidades que, en el caso de haber contado con mayor aireación en la primera etapa, habrían servido para generar el segundo pico de temperaturas.

En base a la adición de roca fosfórica a los tratamientos T1 y T2 se evidenció la clara incidencia de ésta adición en las pruebas de germinación en comparación con el tratamiento T3, sin roca fosfórica, en donde los índices de germinación de los primeros dos tratamientos superaron a los del tercer tratamiento, aspecto esperado al ser el fósforo un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, supliendo de ésta manera la carencia de fósforo que se presenta en el compostaje tradicional; no obstante, la adición de roca fosfórica no demostró acelerar en alguna medida el proceso de compostaje tal como lo indicaba la literatura y también

se constató que el uso, de al menos, el aditivo de fósforo usado en el presente proyecto no aportó al almacenamiento de agua tal como se planteaba en la literatura bajo el argumento de la capacidad sustancial de almacenamiento de agua debido al material altamente poroso.

Se determinó que la pila T1.1 ofreció el mejor proceso de compostaje, dado que generó la máxima temperatura, propiciando una adecuada higienización apoyada en parte por el uso del sistema de confinamiento, así como obtuvo el mejor desempeño en las últimas pruebas de germinación realizadas, desempeño debido principalmente a la adición de una fuente de fósforo externa tal como lo fue la roca fosfórica.

Se recomienda proveer una mayor aireación a los tratamientos confinados mediante el uso de los cajones, ya sea mediante el aumento del diámetro de los orificios, el uso de tubos perforados insertados por los orificios ya existentes o la implementación de un falso fondo que permita la aireación por la parte inferior de los cajones. También mejorar las condiciones de la planta de compostaje para evitar que el sol y el agua lluvia alcancen las pilas y afecten el proceso.

Referencias bibliográficas

- A, H. (1994). Lignin-modifying enzymes from selected white-rot fungi: production and role in lignin degradation.
- Adhikari et al, B. S. (2008). Characterization of food waste and bulking agents for composting. *Waste Management*, Volume 29, 795-804.
- Albuquerque et al, J. G. (2005). Measuring detoxification and maturity in compost made from “alperujo”, the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system. *Chemosphere* volume 64.
- Atkinson et al, C. J. (1996). Biodegradabilities and microbial activities during composting of oxidation ditch sludge. *Compost science & utilization*, volume 4.
- Atkinson, C. J. (1996). Putative anaerobic activity in aerated composts. *Microbiol.*
- Barrington et al, C. D. (2003). Compost convective airflow under passive aeration. *Bioresource Technol*, 259-266.
- Bary, A. (2005). Characterization of fresh yard trimmings for agricultural use. *Science Direct*.
- Bernal et al, M. P.-M. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Biores. Technol.*
- Buswell J.A, O. E. (1987). Lignin biodegradation.
- Chang, & Hsu, T. (2008). Effects of compositions on food waste composting. *Bioresource Technology* volume 99.
- Cheung, H. H. (2010). Microbial-growth inhibition during composting of food waste: effects of organic acids. *Bioresour.*

- Crawford, J. (1983). Composting of agricultural wastes – a review.
- Cruz, W., & García, E. (2016). Evaluación del compostaje de residuos de poda y de alimentos crudos y procesados generados en el campus central de la Universidad Industrial de Santander.
- Elcacho, J. (2016). La Tierra superará los 10.000 millones de habitantes el año 2053.
- Favonio, E., & Hogg, D. (2008). The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste mang.*
- Fernandez et al, R. A.-M. (2014). Application of compost of two-phase olive mill waste on olive grove: Effects on soil, olive fruit and olive oil quality. *Waste Management*, 1139-1147.
- Fernández-Delgado, J. M.-B. (2015). Merging two waste streams, wood ash and biowaste, results in improved composting process and end products. *Total Environ.*
- Francou et al, M. S.-P. (2008). Influence of green waste, biowaste and papercardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology* 99.
- Gabhane et al, W. S. (2012). Additives aided composting of green waste: effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. *Bioresource Technology* Volume 114, 382-388.
- Gaind, S., & Nain, L. (2009). Exploration of composted cereal waste and poultry manure for soil restoration.
- Golueke. (1991). Principles of composting waste. *The Art and Science of Composting*.
- Golueke. (1992). *Bacteriology of composting*.
- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*.
- Hernandez, A. M. (2017). Evaluación del proceso del compostaje de pollinaza fresca y otros materiales orgánicos generados en el páramo de Berlín.

- Huang et al, W. J. (2004). Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Manage*, 805-813.
- Islam et al, D. M. (2015). Survival of *Escherichia coli* O157:H7 in soil and on carrots and onions grown in fields treated with contaminated manure composts or irrigation water. *Food Microbiology*.
- Iyengar, S., & Bhave, P. (2006). In-vessel composting of household wastes. *Waste Manage*, 259-266.
- Kabir et al, A. A. (2015). Pyrolysis of Municipal Green Waste: A Modelling. *Energies* 2015, 8.
- Kurola, J. A. (2011). Wood ash for application in municipal biowaste composting. *Bioresource Technol.*
- Lasaridi et al, P. I. (2006). Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance. *Journal of Environmental Management*.
- Lemus, G., & Lau, A. (2002). Biodegradation of lipidic compounds in synthetic food wastes during composting.
- Levis et al, M. b. (2010). Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada. *Waste Manag.*
- Li et al, H. L. (2013). Experimental and modeling approaches for food waste composting. *Chemosphere* volume 93, 1247-1257.
- Liang, C. D. (2003). The influence of temperature and moisture content regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technol.*
- Mac Gregor et al, F. M. (1981). Composting Process Control Based on Interaction Between Microbial Heat Output and Temperature. *Applied and Environmental Microbiology*, 1321-1330.

- Mathava Kumar, Y.-L. O.-G. (2009). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio.
- McKinley, V. V. (1985). Physical and chemical correlates of microbial activity and biomass in composting municipal sewage sludge.
- Nakasaki, H., & Ohtaki, A. (2002). A simple numerical model for predicting organic matter decomposition in a fed-batch composting operation. *Journal of Environmental Quality*, 997-1003.
- Nakasaki, K. A. (1998). Degradation patterns of organic material in batch and fed-batch composting operations. *Waste Manage.*
- Oliveira et al, U. J. (2011). Transfer of *Listeria innocua* from contaminated compost and irrigation water to lettuce leaves. *Food Microbiology*.
- Oviedo et al, L. F. (2015). Effect of adding bulking materials over the composting process of municipal solid. *Chileno J. Agric. Res.* vol.75 no.4 .
- Oviedo, R. (2017). Co-composting of green waste mixed with unprocessed and processed food waste: influence on the composting process and product quality.
- Paatero J, L. M. (1984). *Kompostointi*.
- Reyes Torres, M. (2017). Pasantía de investigación para la construcción del estado del arte sobre estrategias para optimizar el compostaje de residuos verdes.
- Ríos, U. N. (1997). Optimización de técnicas para la obtención de un compost regional y su utilización por la comunidad como mejorador de suelos.
- Román et al, M. M. (2013). *Manual del compostaje del agricultor*. Santiago de Chile.
- Romero Paredes, A. (2013). *Experiencias internacionales en el composteo de residuos sólidos orgánicos*.

- statistics, T. E. (2006). Report of the Statistics of the Solid Waste. Taiwan: Executive Yuan.
- Strom, P. (1985). Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid-waste composting.
- Tiquia, S. T. (1996). Effect of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environ. Pollut.*
- Troschinetz, A. M. (2009). Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management.*
- Tuomela et al, M. V. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology* Volume 72, 169-183.
- Vandecasteele, B., Boogaerts, C., & Vandaele, E. (2016). Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality. *Science Direct.*
- Varnero et al, C. R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje.
- Wong et al, M. K. (2001). Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. *Biores. Technol.*
- Xuan Wang, A. S. (2013). Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation. *Bioresource Technology.*
- Zhan, L., & Xianggyang, S. (2017). Addition of seaweed and bentonite accelerates the two stage composting of green waste. *Bioresource technology*, 154-162.
- Zhang et al, S. X. (2013). Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste. *Bioresour Technol*, 68-75.
- Zhang, L., & Sun, X. (2017). Addition of fish pond sediment and rock phosphate enhances the composting of. *Science Direct.*

Zhang, L., & Xiangyang, S. (2015). Effects of earthworm cast and zeolite on the two-stage composting of green waste. *Waste Management* Volume 39, 119-129.

Zhu, N. (2007). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology* Volume 98, 9-13.

Zucconi et al, F. M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *Biocycle*

Apéndices

Apéndice A. Valores de interés del aserrín

Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Humedad (%)	C/N	Referencia
55.2	0.43	13.4	128.372093	Ding 2014
51.5	0.12	8.5	367.9	Gao 2010
46.5	0.07	8.12	664	Huang 2004
49.77	0.06	-	829.5	Khan 2014
42.6	0.09	-	473	Kostov 1994
53.2	0.6	-	106	Leconte 2009
-	-	14.4	466.5	Troy 2012
55.3	0.15	-	369	Varnero 2009
40.06	0.26	24.5	154.1	Zhang 2006
55.05	1.8	12	30.55	Zorpas 2008

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

Para decidir los materiales de enmienda a usar, se analizaron las diferentes propiedades fisicoquímicas promedio de cada material y se realizó un balance de masas con cada uno de ellos para obtener una relación C:N de 20. Para esto, se hizo uso de la siguiente ecuación, obtenida del libro *Composting in the Classroom* (Nancy M. Trautmann and Marianne E. Krasny):

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

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 (%)

Asimismo se empleó una segunda ecuación, de la misma fuente bibliográfica, con la finalidad de obtener el contenido de humedad total con la cual contaría la mezcla; pero teniendo presente como principal parámetro de selección la relación C/N, ya que el contenido de humedad total se puede controlar al inicio y a lo largo del procedimiento de compostaje.

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

En la cual:

G = Contenido de humedad total (%)

W_n = Masa del material n (Kg)

M_n = Contenido de humedad del material n (%)

Apéndice C. Información de interés de los sustratos

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. Cajones de confinamiento



Imagen 1. Pila T1.1 el día del montaje



Imagen 2. Retiro de cajones para realizar
volteo



Imagen 3. Compost Pila T1.1 antes de realizar volteo



Apéndice E. Caracterización de los residuos verdes

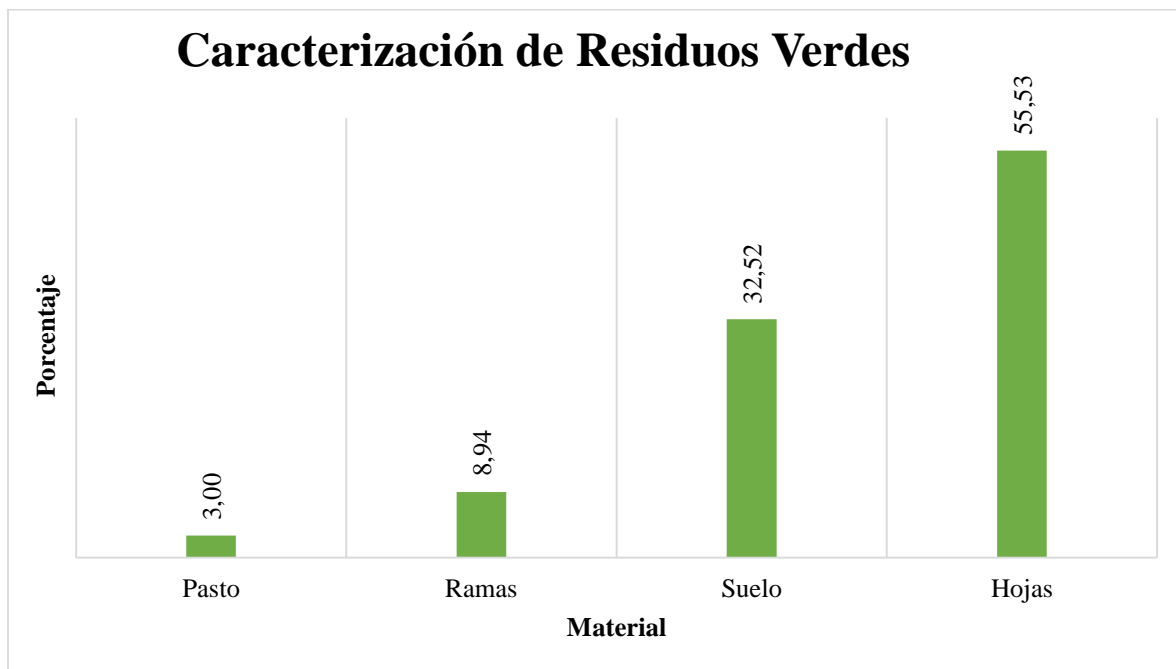
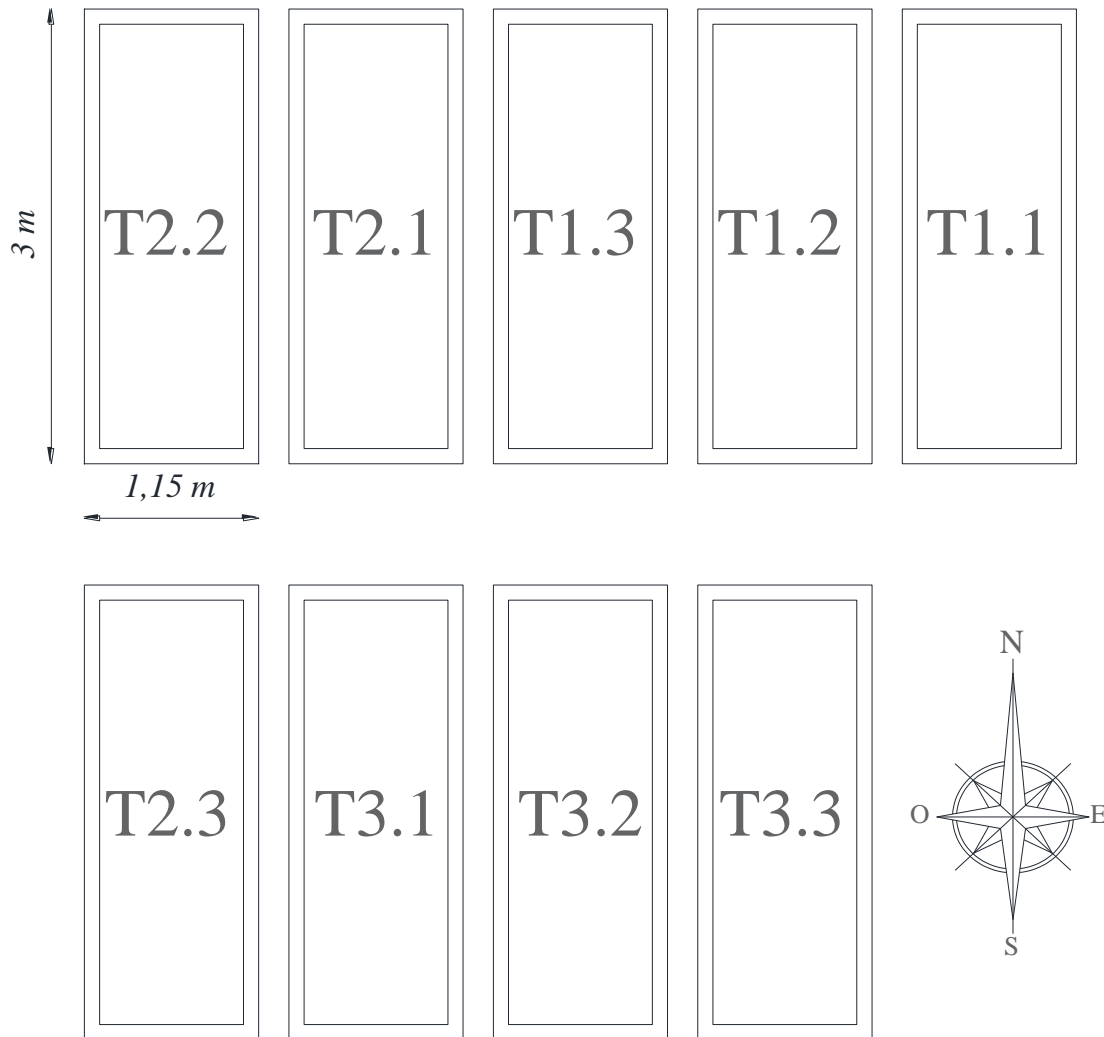


Imagen 4. Cuarteo de los residuos verdes



Imagen 5. Caracterización de los residuos verdes

Apéndice F. Disposición de las pilas en el área experimental.



Tratamiento	Descripción
T1	RV + PR + UPFW + PFW + SWD + Trituración + 2 etapas
T2	RV + PR + UPFW + PFW + SWD + Trituración
T3	RV + UPFW + PFW + SWD + Trituración

Nota: RV. Residuos verdes, PR. Roca fosfórica, UPFW. Residuos de alimentos crudos, PFW. Residuos de alimentos procesados, SWD. Aserrín

Apéndice G. Equipo utilizado y muestreo.

Imagen 6. Medidor Ohaus MB-25



Imagen 7. pH-metro sensION™+ MM374



Imagen 8. Termómetro digital K-Type thermocouple thermometer HI935005N



Imagen 9. Toma de temperaturas

Apéndice H. Pruebas de germinación.





Imagen 10. Cajas de Petri sin solución.



Imagen 11. Cajas de Petri con solución.

Apéndice I. Informe de resultados del análisis fisicoquímico de los sustratos.

	Laboratorio químico de consultas	Código: F-PA-	
	industriales	02	
	Post-Analitico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08	
		Página 1 de 7	



“Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas”





“Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano”

Informe de resultados No.	I-17-709	Fecha de emisión:	Diciembre 07 de 2017
Cliente	EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA		
:			
Dirección del cliente:	Escuela Ingeniería Civil - UIS		
Solicitud de servicio No.	17-600	No. de muestras:	06
Fecha de recepción de las muestras:	Noviembre 17 de 2017		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Noviembre 17 de 2017- Diciembre 06 de 2017		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 17-600-01	Tipo de muestra: Compuesta
Identificación de la muestra: ROCA FOSFORICA	
Matriz de la muestra: Roca	
Muestreo realizado El Cliente por:	
Lugar y punto de muestreo: Páramo de Berlín	
Fecha del muestreo: Noviembre 17 de 2017	

Parámetro	Resultado	Método/ norma
pH Unidades de pH)	2,27	Potenciométrico/NTC 5167
Humedad (%)	0,68	Gravimétrico/NTC 5167
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	0,01	Espectrofotométrico/NTC 5167
Nitrógeno Total (%N)	0,1	Titrimétrico –Kjeldahl/NTC 370
Cenizas (%)	98,28	Gravimétrico/NTC 5167
Potasio (%K ₂ O)	0,14	Absorción Atómica/NTC 5167
Fósforo Total (%P ₂ O ₅)	5,73	Espectrofotométrico/NTC 5167
Conductividad (μS/cm)	206,2	Conductivimétrico/NTC 5167



	Laboratorio químico de consultas industriales	Código: F-PA-02	
	Post-Analitico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08 Página 1 de 7	

Informe de resultados No. I-17-709 Solicitud de servicio No. 17-600

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 17-600-02	Tipo de muestra: Compuesta
Identificación de la muestra: RESIDUOS VERDES	
Matriz de la muestra: Residuos Orgánicos	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Páramo de Berlín	
Fecha del muestreo: Noviembre 17 de 2017	

Parámetro	Resultado	Método/ norma
pH (Unidades de pH)	7,32	Potenciométrico/NTC 5167
Humedad (%)	59,05	Gravimétrico/NTC 5167
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	6,28	Espectrofotométrico/NTC 5167
Nitrógeno Total (%N)	0,89	Titrimétrico -Kjeldahl/NTC 370
Cenizas (%)	31,39	Gravimétrico/NTC 5167
Potasio(%K2O)	0,15	Absorción Atómica/NTC 5167
Fósforo Total (%P2O5)	0,26	Espectrofotométrico/NTC 5167
Conductividad (µS/cm)	452	Conductivimétrico/NTC 5167

	Laboratorio químico de consultas	Código: F-PA-02	
	industriales		
	Post-Analítico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08	
		Página 1 de 7	



Informe de resultados No. I-17-709 Solicitud de servicio No. 17-600

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 17-600-03	Tipo de muestra: Compuesta
Identificación de la muestra: ALIMENTOS CRUDOS	
Matriz de la muestra: Residuos Orgánicos	
Muestreo realizado El Cliente	
por:	
Lugar y punto de muestreo: Páramo de Berlín	
Fecha del muestreo: Noviembre 17 de 2017	

Parámetro	resultado	método/ norma
pH (Unidades de pH)	6,57	Potenciométrico/NTC 5167
Humedad (%)	86,42	Gravimetric/NTC 5167
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	1,69	Espectrofotométrico/NTC 5167
Nitrógeno Total (%N)	0,50	Titrimétrico -Kjeldahl/NTC 370
Cenizas (%)	1,53	Gravimétrico/NTC 5167

Parámetro	resultado	método/ norma
Potasio (%K ₂ O)	0,69	Absorción Atómica/NTC 5167
Fósforo Total (%P ₂ O ₅)	0,13	Espectrofotométrico/NTC 5167
Conductividad (μS/cm)	1508	Conductivimétrico/NTC 5167

	Laboratorio químico de consultas industriales	Código: F-PA-02	
	Post-Analitico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08 Página 1 de 7	

Informe de resultados No. I-17-709 Solicitud de servicio No. 17-600

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 17-600-04	Tipo de muestra: Compuesta
Identificación de la muestra: ALIMENTOS PROCESADOS	
Matriz de la muestra: Residuos Orgánicos	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Paramo de Berlín	
Fecha del muestreo: Noviembre 17 de 2017	

Parámetro	Resultado	Método/ norma
pH (Unidades de pH)	3,95	Potenciométrico/NTC 5167
Humedad (%)	67,49	Gravimetric/NTC 5167
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	7,42	Espectrofotométrico/NTC 5167
Nitrógeno Total (%N)	0,40	Titrimétrico -Kjeldahl/NTC 370
Cenizas (%)	1,07	Gravimétrico/NTC 5167
Potasio (%K ₂ O)	0,26	Absorción Atómica/NTC 5167
Fósforo Total (%P ₂ O ₅)	0,14	Espectrofotométrico/NTC 5167
Conductividad (μS/cm)	1996	Conductivimétrico/NTC 5167

	Laboratorio químico de consultas industriales	Código: F-PA-02	
	Post-Analítico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08	
		Página 1 de 7	

Informe de resultados No. I-17-709**Solicitud de servicio No.****17-600**

5. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 17-600-05	Tipo de muestra: Compuesta
Identificación de la muestra: T2 R.F+A.C+A.P+AC+RV	
Matriz de la muestra: Residuos Orgánicos	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Paramo de Berlín	
Fecha del muestreo: Noviembre 17 de 2017	

Parámetro	Resultado	método/ norma
pH (Unidades de pH)	7,17	Potenciométrico/NTC 5167
Humedad (%)	42,05	Gravimetric/NTC 5167
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	13,72	Espectrofotométrico/NTC 5167
Nitrógeno Total (%N)	0,48	Titrimétrico -Kjeldhal/NTC 370
Cenizas (%)	22,81	Gravimétrico/NTC 5167
Potasio (%K ₂ O)	0,81	Absorción Atómica/NTC 5167
Fósforo Total (%P ₂ O ₅)	0,85	Espectrofotométrico/NTC 5167
Conductividad (μS/cm)	367	Conductivimétrico/NTC 5167


	Laboratorio químico de consultas industriales	Código: F-PA-02	
	Post-Analítico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08	
		Página 1 de 7	

Informe de resultados No. I-17-709 Solicitud de servicio No. 17-600

6. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 17-600-06	Tipo de muestra: Compuesta
Identificación de la muestra: T3 R.F+A.C+A.P+AC+RV	
Matriz de la muestra: Residuos Orgánicos	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Paramo de Berlín	
Fecha del muestreo: Noviembre 17 de 2017	

Parámetro	Resultado	método/ norma
pH (Unidades de pH)	7,23	Potenciométrico/NTC 5167
Humedad (%)	60,46	Gravimetric/NTC 5167
Carbono Orgánico Total Oxidable (%C)	9,65	Espectrofotométrico/NTC 5167
Nitrógeno Total (%N)	0,77	Titrimétrico -Kjeldhal/NTC 370
Cenizas (%)	11,72	Gravimétrico/NTC 5167
Potasio (%K2O)	0,22	Absorción Atómica/NTC 5167
Fósforo Total (%P2O5)	0,34	Espectrofotométrico/NTC 5167
Conductividad (µS/cm)	509	Conductivimétrico/NTC 5167

	Laboratorio químico de consultas industriales	Código: F-PA-02	
	Post-Analítico	Versión: 06	
	Informe de resultados	Fecha: 2016/06/08	
		Página 1 de 7	

Informe de resultados No. I-17-709 Solicitud de servicio No. 17-600

Observaciones: *Ninguna*

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración:
Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo Directora del

Laboratorio Química. M.Sc Química UIS MP

PQ 1144

Elaboró: Amparo López Guerrero

Apéndice J. Comportamiento del pH de los tratamientos

