

Comparación del efecto de la adición de biochar en diferentes fases del proceso en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos

Andrea Carolina Galezo Suárez y Judy Tatiana Diaz Larotta

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Brayan Alexis Parra Orobio

PhD en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Codirectores

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Viviana Sánchez Torres

PhD en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

### Dedicatoria

*A Dios, por colmarme de capacidades intelectuales para la culminación de mi carrera.*

*A mis amados padres Luis Eduardo Galezo Guerra y Magaly Suárez Sánchez, que me han acompañado, guiado y apoyado en cada paso de mi camino, por inculcarme tantos valores que hoy llevo conmigo; y que hacen que este título obtenido no es solo mío, sino también de ellos.*

*A mi hermana Mayra Alejandra, mi compañía y apoyo durante este proceso; su consejo y amistad fue fundamental para mantenerme firme y llegar a la culminación de mi carrera.*

*A mis primas Laura Vanessa, Mónica y María Angelica, quienes escucharon mis dificultades, ofrecieron su consejo y me apoyaron en cada paso que realizaba.*

*A toda mi familia agradezco el amor constante, los consejos y el aliento que me impulsaron a continuar esforzándome por mis metas.*

*A mi familia del CEIQ: Mario, Andrea, Eliana, Erika, Gabriel, Javier, David y Salomé. Quienes me llenaron con su cariño y comprensión; gracias por formar parte de mí y mi carrera.*

*A mi amiga Lissibeth, que compartió conmigo parte de la carrera universitaria y se convirtió en un pilar fundamente en una ciudad diferente a la de mi nacimiento.*

*A mi gran amiga y compañera de trabajo de grado Judy Diaz, por formar parte de este equipo excepcional que culminó con éxito este proyecto; gracias por compensar mis falencias, la paciencia y la entrega depositada en cada etapa de nuestro trabajo.*

*Finalmente, me siento muy orgullosa de mí, por no desfallecer en el camino y alcanzar la meta que me propuse. Hoy puedo decir con alegría que soy ingeniera química.*

***Andrea Carolina Galezo Suárez.***

*A mis queridos padres, Héctor Díaz y Edilia Larotta quiero expresarles mi profunda gratitud por su incondicional apoyo, amor y los sacrificios que han realizado por mí; ustedes son mi mayor motivación y mi orgullo, y todo lo que he logrado es gracias a su constante respaldo.*

*A mi hermano Luis Arturo, agradezco su amistad y apoyo emocional, que han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional.*

*A mis queridos primos, María, Lucía, Alejandro y Santiago, quienes con sus ocurrencias siempre lograban alegrarme el día, les prometo ser un ejemplo a seguir, para que vean que con esfuerzo y dedicación se pueden alcanzar grandes metas.*

*A Eddison Mauricio, quien me acompañó en este camino, le agradezco su apoyo, experiencia, sentido del humor y ejemplo, que me han motivado a nunca rendirme y a seguir luchando por mis sueños.*

*A mi familia y amigos, quienes siempre creyeron en mí y me brindaron su apoyo incondicional durante este proceso, les agradezco por sus palabras de aliento en los momentos difíciles.*

*A mi gran amiga Andrea Galezo, gracias por confiar en mí y por elegirme como su compañera de proyecto de grado. Nuestro esfuerzo, compromiso y dedicación conjunta han culminado en un proceso tan especial que nos unirá siempre.*

*A mí, por convertirme en la ingeniera química que soy hoy en día. Estoy dispuesta a seguir creciendo profesionalmente y a enfrentar nuevos desafíos con determinación y pasión. Gracias a todos por formar parte de este importante logro en mi vida.*

**Judy Tatiana Díaz Larotta**

### **Agradecimientos**

*A Dios por ayudarnos en cada paso para la culminación de este proyecto, por la fortaleza y sabiduría brindada para superar cada obstáculo encontrado en el camino. Su guía ha sido fundamental en cada etapa de este proceso.*

*A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma máter por todas las enseñanzas brindadas durante nuestra carrera universitaria, sus espacios y herramientas han sido fundamental para nuestro desarrollo como profesional. Estamos orgullosas de ser parte de esta prestigiosa institución y agradecidos por el apoyo constante que hemos recibido de parte de sus técnicos en laboratorio, docentes y personal administrativo.*

*A la Escuela de Ingeniería Química por su compromiso con nuestra formación académica y personal, gracias a su guía somos personas que desean trabajar por la mejora de su país y convertirse en un profesional de calidad.*

*Al director y codirectores de nuestro proyecto de grado, por su valioso tiempo, dedicación y conocimientos impartidos, gracias a su orientación, hemos logrado alcanzar nuestros objetivos y culminar este proyecto de manera exitosa.*

*Finalmente, a nuestros amigos y compañeros, su apoyo, amistad y colaboración, han sido una fuente constante de motivación y aliento, y estamos agradecidos por su presencia en nuestras vidas.*

*Estamos orgullosas del trabajo realizado y confiamos en que los conocimientos adquiridos nos servirán como base sólida para enfrentar los desafíos futuros.*

## Tabla de contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo General .....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Estado del Arte .....	17
3. Descripción Metodológica .....	21
3.1 Recopilación de información .....	21
3.2 Recolección y montaje experimental .....	22
3.2.1 Recolección y acondicionamiento .....	22
3.2.2 Montaje experimental .....	22
3.3 Medición de parámetros.....	24
3.3.1 Temperatura .....	25
3.3.2 pH.....	25
3.3.3 Conductividad eléctrica .....	26
3.3.4 Humedad .....	26
3.3.5 Sólidos volátiles .....	27
3.3.6 Fitotoxicidad .....	27
3.4 Análisis fisicoquímico y estadístico.....	29
3.4.1 Caracterización fisicoquímica.....	29
3.4.2 Análisis estadístico.....	30
4. Resultados y análisis de resultados .....	30
4.1 Efecto de la incorporación del biochar sobre los parámetros operacionales .....	30
4.1.1 Temperatura .....	30
4.1.2 pH.....	33
4.1.3 Conductividad Eléctrica (CE).....	35
4.1.4 Humedad .....	37
4.1.5 Sólidos Volátiles.....	38
4.1.6 Fitotoxicidad .....	39
4.1.7 Carbono orgánico total (COT).....	41

4.1.8 Nitrógeno total (NT) .....	42
4.1.9 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N).....	43
4.1.10 Fósforo total (PT).....	44
4.2 Diferencias en los parámetros de calidad del producto obtenido de la adición de biochar en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos. ....	46
5. Conclusiones .....	48
6. Recomendaciones .....	49
Referencias Bibliográficas .....	50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Cantidades de los sustratos en el montaje .....	23
Tabla 2. Métodos usados en la caracterización del producto final .....	29
Tabla 3. Recopilación de las fases del proceso .....	31
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de los productos finales .....	46

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de las etapas de la metodología de la investigación.....	21
Figura 2. Configuración del montaje experimental .....	24
Figura 3. Puntos en la toma de la temperatura.....	25
Figura 4. Comportamiento de las temperaturas durante el proceso de co-compostaje.....	32
Figura 5. Comportamiento del pH durante el proceso de co-compostaje.....	34
Figura 6. Comportamiento de la conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje..	35
Figura 7. Comportamiento de la humedad durante el proceso de co-compostaje .....	37
Figura 8. Comportamiento de los sólidos volátiles durante el proceso de co-compostaje .....	38
Figura 9. Comportamiento del índice de germinación durante el proceso de co-compostaje .....	40
Figura 10. Comportamiento del COT en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje.....	41
Figura 11. Comportamiento del NT en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje .....	43
Figura 12. Comportamiento de la relación C/N en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje .....	44
Figura 13. Comportamiento del PT en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje .....	45

### Glosario<sup>1</sup>

**Biochar:** producto obtenido a partir de la descomposición térmica de biomasa con escaso o limitado suministro de oxígeno, a temperaturas menores de 700 °C (Escalante Rebolledo et al., 2016).

**Celulosa:** sustancia blanca, fibrosa y translúcida que se encuentra en las paredes de las células vegetales y que constituye la parte principal de la madera y otros tejidos vegetales.

**Co-compostaje:** compostaje con diferentes sustratos.

**Compost:** abono orgánico obtenido a partir de la descomposición controlada de residuos vegetales y/o de alimentos.

**Compostaje:** proceso biológico aerobio de degradación de la materia orgánica, en condiciones controladas, que da lugar a un material estable, también llamado abono o enmienda orgánica.

**Compuesto lábil:** inestable, que se transforma fácilmente en otro. Compuesto propenso a descomponerse o reaccionar rápidamente en ciertas condiciones.

**Conductividad eléctrica (CE):** capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, también indica indirectamente la concentración de sales solubles, entre mayor sea la conductividad eléctrica más alto es el valor de esta (Ramírez Velásquez et al., 2022).

**Co-sustrato:** mezcla de diferentes materiales orgánicos para la descomposición y transformación de la materia orgánica.

**Enmienda:** son utilizadas para mejorar las condiciones físicas, químicas y microbiológicas del suelo, permitiendo aumentar los macro y micronutrientes necesarios para que las plantas mejoren su producción (Murillo Montoya et al., 2019).

**Fitotoxicidad:** determinación de sustancias tóxicas para evaluar los efectos sinérgicos de estas sobre la germinación y crecimiento de las plantas (Teresa Varnero et al., 2007).

---

<sup>1</sup>Real Academia Española, s.f *Diccionario de la lengua española*. <https://www.rae.es/>

**Hemicelulosa:** término general con que se conoce a los polisacáridos distintos de la celulosa que son constituyentes de las paredes celulares de los vegetales.

**Higienización:** requisito del compost basado en condiciones de temperatura-tiempo. Las altas temperaturas y su mantenimiento durante periodos largos permiten destruir los patógenos presentes en el compostaje y prevenir el crecimiento y propagación de estos (Barrena Gómez, 2006).

**Índice de germinación (IG):** es una prueba utilizada para observar el comportamiento de la planta bajo la presencia de agentes tóxicos presentes en los abonos orgánicos. Si el abono orgánico no ha sido estabilizado y madurado de la forma correcta, se encontrarán sustancias fitotóxicas que puedan estar afectando la germinación de la semilla (Castillo et al., 2021).

**Lignina:** compuesto orgánico básico de los tejidos leñosos de las plantas.

**Lignocelulosa:** es el principal y más abundante componente de la biomasa producida por la fotosíntesis, compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina (Cuervo et al., 2009).

**Material de soporte:** es fundamental para mejorar las condiciones del proceso de compostaje, incrementando la porosidad del material y la aireación, y propiciando condiciones más favorables de pH, humedad y relación C/N para el desarrollo de microorganismos (Oviedo-Ocaña et al., 2013).

**Mesofílica:** fase inicial del compostaje donde se desarrollan familias de microorganismos mesófilos, que inician la descomposición de las moléculas más fácilmente degradables. Esta actividad de descomposición genera energía que se libera en forma de calor y se traduce en un aumento paulatino de la temperatura (Barrena Gómez, 2006).

**pH:** es la sigla de potencial de hidrógeno y es un índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución.

**Residuos de alimentos no procesados (RANP):** también llamados residuos de alimentos frescos o naturales se definen como partes de plantas (semillas, hojas, raíces, frutas) (Monteiro & Cannon, 2012) Proporciona materia orgánica fácilmente degradable y un suministro de nitrógeno (Reyes Torres et al., 2018).

**Residuos de alimentos procesados (RAP):** alimentos que pasaron por un proceso de cocción (Monteiro & Cannon, 2012). Proporciona materia orgánica fácilmente degradable y un suministro de nitrógeno (Reyes Torres et al., 2018).

**Residuos verdes (RV):** comprende hojas, recortes de césped, desechos de poda, ramas, recortes de madera, recortes de jardín, plantas pequeñas, malezas y desechos vegetales, estos son compuestos lignocelulósicos que se degradan lentamente (Reyes Torres et al., 2018).

**Termofílica:** fase del compostaje que va después de la mesofílica. Se caracteriza por un elevado consumo de oxígeno y liberación calor que comprende temperaturas elevadas donde se consigue eliminar los microorganismos patógenos para asegurar la higienización del producto final (Barrena Gómez, 2006).

**Volatilización:** transformar una sustancia en gas.

### Resumen

**Título:** Comparación del efecto de la adición de biochar en diferentes fases del proceso en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos \*

**Autor:** Andrea Carolina Galezo Suarez y Judy Tatiana Diaz Larotta \*\*

**Palabras clave:** Residuos verdes, residuos de alimentos, biochar, co-compostaje, termofílica.

**Descripción:** El compostaje es uno de los métodos utilizados para el tratamiento de residuos verdes, pero debido a sus largos tiempos para completar el proceso no es un método viable para su producción en masa. En esta investigación se estudió la adición de 2% de biochar en el co-compostaje de residuos verdes (RV) y residuos de alimentos procesados (RAP) y no procesados (RANP), en la fase termófila (T2) y al inicio del proceso (T1) con el fin de obtener una mejora en el proceso en general e indagar en qué momento del proceso es más efectiva su adición, mediante la evaluación de parámetros físicos y químicos en el proceso y en el compost. La adición de biochar en diferentes etapas no afectó significativamente los parámetros operacionales en el proceso de compostaje como: pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura, humedad, sólidos volátiles o el índice de germinación (IG); conclusión a la cual se llegó después de realizar el análisis estadístico. Para el análisis del producto final se implementó la comparación de varios parámetros con normas de otros países, obteniendo como resultado dos productos maduros de buena calidad, con valores de la relación C/N de 14.82 (T1) y 10.78 (T2) e índices de germinación de 139.40 y 126.11 respectivamente, sin diferencia evidente entre los dos tratamientos.

---

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Director: Brayan Alexis Parra Orobio. PhD en Ingeniería. Codirectores: Viviana Sánchez Torrez. PhD en Ingeniería. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD en Ingeniería.

### Abstract

**Title:** Comparison of the effect of biochar addition at different stages of the process in the co-composting of green and food waste\*

**Author(s):** Andrea Carolina Galezo Suarez y Judy Tatiana Diaz Larotta\*\*

**Key Words:** Green waste, food waste, biochar, co-compost, thermophilic.

**Description:** Composting is one of the methods used for treating green waste, but due to its long time to complete the process is not a viable method for mass production. In this research we studied the addition of 2% of biochar in the co-composition of green waste (GW) and processed food waste (PFW) and unprocessed (UPFW), in the thermophilic phase (T2) and at the beginning of the process (T1) in order to obtain an improvement in the process in general and to inquire at what point in the process its addition is more effective, by evaluating physical and chemical parameters in the process and in the compost. The addition of biochar in different stages did not significantly affect the operational parameters in the composting process such as: pH, electrical conductivity (EC), temperature, humidity, volatile solids or germination index (GI); conclusion reached after the statistical analysis. For the analysis of the final product, the comparison of several parameters with standards from other countries was implemented, resulting in two mature products of good quality, with values of the ratio C/N of 14.82 (T1) and 10.78 (T2) and germination index of 139.40 and 126.11 respectively, with no obvious difference between the two treatments.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Chemical Engineering. Director: Brayan Alexis Parra Orobio. PhD in Engineering. Co-directors: Viviana Sánchez Torrez. PhD in Engineering. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. PhD in Engineering.

## Introducción

En Colombia la cantidad de residuos sólidos generados ha incrementado con los años, para el 2015 se tenían 9,967,844 t/año (Superservicios & DNP, 2016) y en el año 2020 llegó a 11,952,440.90 t/año (SSPD & DNP, 2023). En un informe realizado por Banco Mundial y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (2021) se estimó que de estos residuos el 61% son de carácter orgánico y según los reportes de las empresas de servicios públicos entre los años 2016-2019 se generaron alrededor de 267,000 t de la actividad de limpieza urbana, de los cuales la mayoría son residuos provenientes del corte de césped y la poda de árboles, los cuales son denominados residuos verdes (RV); tradicionalmente estos se tratan mediante quema o depósito en rellenos sanitarios (Zhang & Sun, 2016).

Una alternativa de tratamiento de los RV es el compostaje, pero debido a la baja tasa de degradación de los compuestos lignocelulósicos (lignina, celulosa y hemicelulosa) que lo conforman (aproximadamente el 75% de peso seco de los RV) (Reyes Torres et al., 2018), y su bajo contenido en nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (Muniyasamy et al., 2013), representan tiempos prolongados de degradación de la materia orgánica y baja calidad del producto final (Gabhane et al., 2012). Una estrategia implementada para mejorar el proceso es el co-compostaje con diferentes materiales como los residuos de alimentos, el cual ha venido siendo empleado con mejoras sustanciales en la reducción del tiempo del proceso y en la calidad del producto (Hernández Gómez et al., 2021; Joya Rangel et al., 2022; Oviedo-Ocaña et al., 2019, 2021; Oviedo-Ocaña et al., 2022); sin embargo, aún presenta retos como la reducción de la pérdida de nitrógeno en el proceso.

Un aditivo de estudio reciente es el biochar implementado en el proceso de compostaje de RV, residuos de alimentos procesados (RAP) y residuos de alimentos no procesados (RANP)

(Hernández Cruz et al., 2023). Malinowski et al. (2019) realizaron el estudio de la adición de biochar al inicio de la fase mesófila en el compostaje de la fracción orgánica de residuos municipales con dosis de 1.5%, 3% y 5%, y observaron que para todas las dosis se obtuvo una reducción de las pérdidas de nitrógeno, reducción de la fitotoxicidad y una mayor relación C/N en el producto. En otro estudio, se compostó el estiércol de ave de corral y paja de cebada, se adicionó 3% de biochar al inicio del proceso y como resultado se obtuvo el aumento de la temperatura, lo cual redujo el tiempo de duración de la fase termofílica (Sánchez García et al., 2015). De acuerdo con la investigación realizada por Parra-Orobio et al., (2023), donde se evaluó el efecto de la adición de diferentes porcentajes de biochar (2% y 5%) al inicio del proceso de co-compostaje de RV, RAP y RANP, se obtuvo como resultado el aumento de la actividad biológica, prolongación de la fase termófila, reducción de hemicelulosa, celulosa y organismos patógenos y menores pérdidas totales de nitrógeno. Teniendo en cuenta que la adición del biochar al inicio del compostaje ha demostrado tener un efecto positivo, tanto en el proceso como en el producto final, ¿Cuál sería el comportamiento del proceso y producto del compostaje si se realiza su adición en la fase termofílica que es conocida por su gran actividad microbiana y altas temperaturas?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto de la adición de biochar en diferentes fases del proceso del co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Comparar el efecto de la incorporación del biochar en las fases mesofílica y termofílica sobre los parámetros operacionales del co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.
- ✓ Determinar las diferencias en la calidad de los compost obtenidos mediante el cumplimiento de los estándares establecidos por la norma técnica colombiana (NTC).

## 2. Estado del Arte

En el manejo del volumen de los RV, algunas de las técnicas utilizadas para su tratamiento son: compostaje, digestión anaerobia, incineración, pirólisis y gasificación (Liu X et al., 2023), de las cuales la mayoría se enfoca en la generación de un producto para remplazar o suplir la demanda de los combustibles fósiles (Morris et al 2013); sin embargo, el compostaje se enfoca en brindar subproductos de valor agregado para los suelos.

La baja tasa de descomposición de los RV es una desventaja para su compostaje, no obstante, es un aspecto que se puede mejorar para hacer el proceso más viable. Reyes Torres et al. (2018) mencionan algunas estrategias para su mejora, tales como: la reducción del tamaño de las partículas, la adición de enmiendas, de materiales de soporte y de inóculos microbianos, y el cambio en los parámetros de operación; la implementación de estas estrategias da como resultado la reducción de la duración del proceso y un producto final de alta calidad (Parra-Orobio et al., 2023).

Una alternativa empleada para suplir las falencias del compostaje de RV es el co-compostaje con diferentes sustratos; en un estudio realizado por Zhang & Sun, (2017) se compostaron residuos verdes con estiércol de vaca y/o residuos de café molido para mejorar la relación C/N y la cantidad de nutrientes en el producto final, pero el resultado de este estudio fue la pérdida de nitrógeno en el producto final. En un estudio realizado por Zhang et al. (2013) se evaluó la adición de la adición de azúcar morena (0%, 0.5% y 1%) con superfosfato de calcio (0%, 3% y 6%) obteniendo como resultado un aumento en la duración del periodo de fermentación a alta temperatura y una reducción del tiempo de madurez (30 días), donde para una composición de 0.5 % de azúcar morena y 6% de superfosfato se produjo un compost de mayor calidad.

Otro estudio realizado por Oviedo-Ocaña et al. (2019) donde se empleó el compostaje de RV y de su mezcla con RAP y RANP, se obtuvo como resultado una mejora en la calidad del

producto final gracias a la implementación del co-compostaje, lo cual se vio reflejado en una adecuada relación C/N, una disminución en el porcentaje de cenizas, mayor concentración en fósforo total (PT), valores más bajos de conductividad eléctrica (CE) y un índice de germinación más alta; la implementación de los co-sustratos aportó compuestos de rápida degradación (carbohidratos y proteínas); otro resultado obtenido por este estudio fue el alcance de temperaturas termófilas en un tiempo más corto (días 2 y 3) en el proceso de compostaje de RV con co-sustratos en comparación de solo RV.

Otra alternativa es el uso de los materiales de enmienda y los materiales de soporte, los cuales se emplean para la mejora de las características del sustrato y su biodegradabilidad (Oviedo-Ocaña et al., 2022). Por otra parte, se encuentran estudios de la inoculación de bacterias y consorcios microbianos también empleados para la degradación de los compuestos lignocelulósicos; sin embargo, algunos autores como Ma et al., (2020) y Zhu et al., (2021) afirman que se han identificado pocos consorcios microbianos en la degradación de la lignocelulosa; aun así los mecanismos de la comunidad microbiana en la transformación de la materia orgánica durante el compostaje de la lignocelulosa son todavía desconocidos (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

Estudios realizados recientemente se han enfocado en la implementación de biochar como un aditivo con mayores beneficios para el proceso de compostaje, este puede ser utilizado en una mezcla con los materiales a compostarse o con el producto maduro del compost (Vandecasteele et al., 2016); al realizar su adición durante el proceso de compostaje cambia las propiedades y la calidad del producto final. Algunas de las propiedades que este material controla o modifica son: contenido de humedad, condiciones de los nutrientes, la aireación y el pH, lo cual proporciona un entorno de vida óptimo para el crecimiento microbiano (Behera & Samal, 2022).

Respecto a la incursión de este material en el co-compostaje con RV se han realizado varios estudios, entre ellos se encuentra el de Qiu et al. (2019) en el cual se mezclaron los RV con estiércol vacuno o avícola, y se incorporó biochar de paja de trigo en una proporción del 10% del peso total de cada mezcla al inicio de la fase mesófila, con el fin de analizar la influencia en la relación C/N y la composición de la comunidad bacteriana, del cual se obtuvo como resultado el aumento de la temperatura y extensión de la fase termófila (11 y 12 días) en comparación con los que no se le adicionó biochar (9 días). Otra investigación realizada por Barthod et al. (2016), en donde se implementó el compostaje de RV con arcilla y/o biochar obtenido de la gasificación de residuos de madera de pino, adicionados al inicio de la fase mesófila, presentó como resultado la reducción del 24% de las emisiones de CO<sub>2</sub> con un 10% p/p de biochar y un 46% de la mezcla con biochar y arcilla (10% y 25% p/p respectivamente), además el biochar por sí solo redujo el porcentaje de mineralización del carbono en el producto final del compost.

Respecto a los cambios físicos, químicos y microbiológicos, Zhang & Sun, (2014) realizaron un estudio del co-compostaje de RV adicionando residuos de hongos y/o biochar obtenido de la pirólisis de la fibra de coco, añadidos desde el inicio del proceso del compostaje del cual se tomaron 10 muestras variables obteniendo como resultado una reducción significativa del tiempo. La adición del 35% peso seco de residuos de hongos comestibles y 20% peso seco de biochar con la implementación del método de dos etapas de la fase termófila, disminuyó la duración del proceso de entre 90-270 días a tan solo 24 días con un producto final de alta calidad. Picca et al. (2023) desarrollaron una investigación de la adición de cascarilla de café y biochar (obtenido por pirólisis de troncos y ramas de pino Aleppo) con RV, realizando la homogeneización de la materia prima y los co-sustratos desde el inicio del proceso de co-compostaje; se evidenció un incremento de los

porcentajes de nitrógeno y potasio además de una elevada capacidad de retención de agua, obteniendo un producto de alto valor agronómico.

En otro estudio realizado por Parra-Orobio et al., (2023) en conjunto con el grupo de investigación GPH de la Universidad Industrial de Santander, se realizó una variación en los porcentajes de biochar (2% y 5%), obteniendo como resultado la mejora de las tasas de degradación de la materia orgánica, la degradación lignocelulósica y la calidad del producto final, resaltando que la adición de 2% de biochar generó el índice de fertilidad más alto, mostrando su potencial para el uso agrícola.

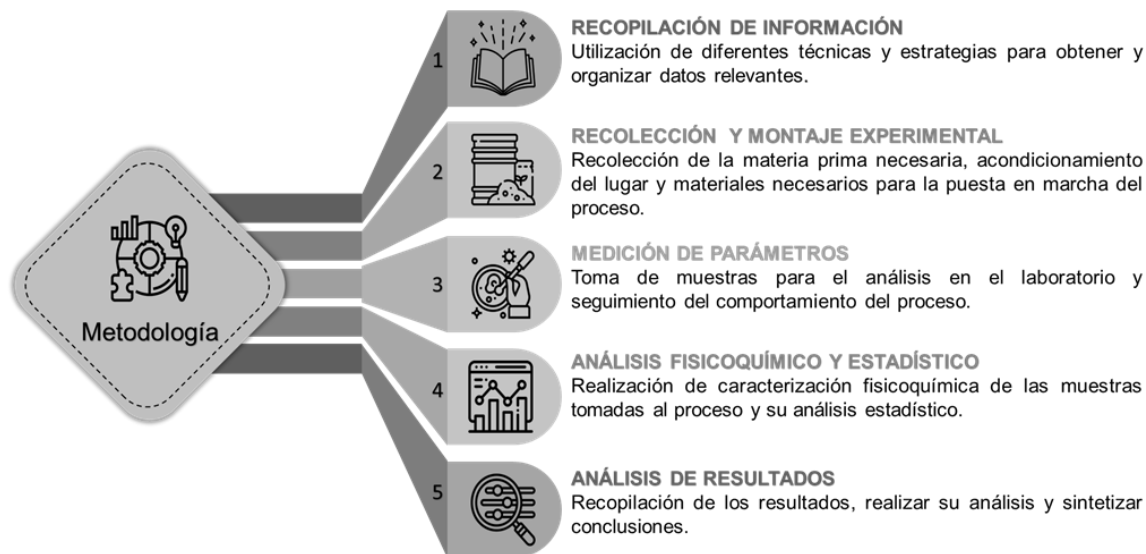
Teniendo en cuenta lo demostrado por estudios anteriores donde el biochar tiene un efecto significativo en la reducción de las pérdidas de nitrógeno (N) y en el mejoramiento del crecimiento microbiano además que la fase termofílica es la más activa del proceso, se considera que podría mejorar las condiciones del proceso en esta fase por tal motivo, se decidió hacer una investigación en el que se comparará la adición del biochar al inicio de dos fases diferentes (mesófila y termófila) en la producción de co-compostaje de residuos verdes y alimentos para evaluar su influencia en la duración del proceso y en la calidad del producto, siguiendo la línea de investigación trazada en anteriores trabajos.

### 3. Descripción Metodológica

Las etapas implementadas para el desarrollo de la investigación expuestas anteriormente se muestran a continuación:

**Figura 1.**

*Esquema de las etapas de la metodología de la investigación*



#### 3.1 Recopilación de información

Esta fase se ejecutó mediante la revisión de la bibliografía necesaria para el adecuado desarrollo de la investigación, implementando motores de búsqueda tales como Scopus®, ScienceDirect® y Goglee Scholar®, con las palabras claves: “green waste or yard Waste or garden Waste or pruning waste” and “biochar” and “compost”; y las áreas de: “Agricultural and Biological Sciencs”., “Energy”, “Environmental Science”, “Chemical Engineering”, “Chemistry”, “Earth and Planetary Sciences”, “Immunology and Microbiology” y “Social Sciences”, con el objetivo de seleccionar los artículos relacionados al tema de interés lo que facilitó la recopilación de información.

### **3.2 Recolección y montaje experimental**

Para poner en marcha la parte experimental de la investigación se llevó a cabo la recolección de la materia prima necesaria y el acondicionamiento del espacio que se utilizó, para proceder al montaje experimental.

#### ***3.2.1 Recolección y acondicionamiento***

Los sustratos que se implementaron en el proceso de co-compostaje son RV, RAP y RANP. Los RV corresponden al sustrato principal, estos procedieron de las actividades de corte y poda que se realizan en el campus central de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Por otro lado, los RAP y RANP se obtuvieron de la sección de comedores del servicio de bienestar universitario conformados por los desperdicios de los almuerzos que se entregan diariamente y algunos residuos de la plaza de mercado de San Francisco. El proceso realizado para la recolección de los residuos mencionados anteriormente se desarrolló durante las 2 semanas previas al día del montaje del proceso, transportando los residuos desde su lugar de recolección al lugar estipulado para su almacenamiento y conservación, a una temperatura de 4 °C.

#### ***3.2.2 Montaje experimental***

Para el montaje experimental de los dos tratamientos T1 (adición biochar fase mesófila) y T2 (adición biochar fase termófila) y sus réplicas (RT1 y RT2), se transportaron todos los residuos recolectados al sitio dispuesto en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander (UIS), cada uno de los reactores estuvo compuesto por: 48% residuos verdes (RV); 32.5% residuos de alimentos no procesados (RANP); 2.5% residuos de alimentos procesados (RAP); 13% aserrín (As) cuyo objetivo fue suministrar soporte además de porosidad y estructura; 2% roca fosfórica (RF) como material de enmienda que provee fósforo y contribuye a la reducción de la volatilización de nitrógeno y 2% de biochar de tipo comercial, el cual procede de residuos de poda y jardín

del sector agrícola. Estos porcentajes se tomaron como referencia del estudio realizado por Hernández Cruz et al., (2023). En la Tabla 1 se denotan las proporciones y cantidades de la materia prima implementada en el proceso.

**Tabla 1.**

*Cantidades de los sustratos en el montaje*

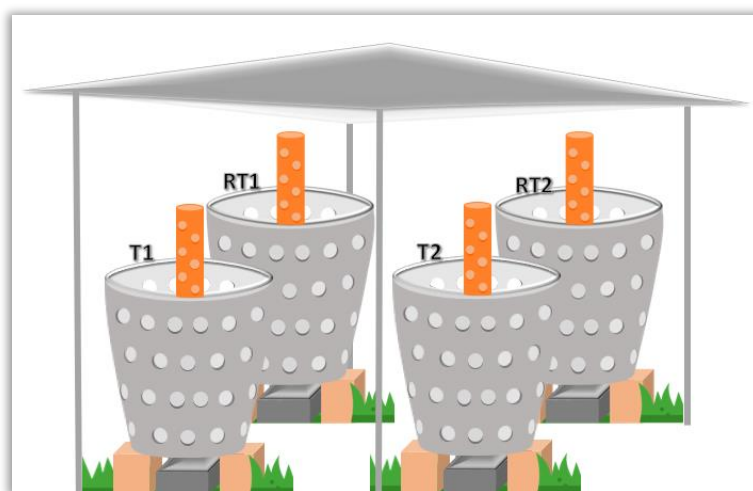
<b>Material</b>	<b>Cantidad por reactor (kg)</b>	<b>Porcentaje por reactor (%p/p)</b>
Residuos verdes (RV)	19.20	48
Cebolla	2.27	5.69
Papa	2.17	5.43
Residuos de alimentos no procesados (RANP)	4.38	10.95
Fruta	4.38	10.95
Zanahoria	0.21	0.52
Lechuga	2.33	5.82
Plátano	0.58	1.46
Yuca	1.05	2.63
Residuos de alimentos procesados (RAP)	1	2.50
Aserrín (As)	5.20	13
Roca fosfórica (RF)	0.80	2
Biochar (B)	0.80	2
<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>100</b>

Se tuvieron a disposición cuatro reactores de polietileno, con forma cónica, una altura de 0.85 m, un radio de 0.3 m, un volumen de 250 L, una capacidad de 40 kg c/u, recubiertos por un aislante térmico para brindarles aislamiento térmico. Cada uno de ellos contaban con orificios de 2 cm de diámetro ubicados a distancias iguales en el perímetro del reactor y un tubo de 11.5 cm de diámetro y 1 m de largo ubicado en el centro del tanque los cuales ayudaron en el proceso de aireación. Para el montaje de cada uno de los reactores, se trituraron manualmente los RV, se pesaron cada uno de los materiales y se adicionaron en el siguiente orden en el reactor: 10 kg de RV, aserrín, biochar (T1 y RT1), RAP y RANP, roca fosfórica y por último el restante de los RV, para

finalmente realizar su mezcla de forma manual en el reactor. En los reactores T2 y RT2 la adición del biochar se realizó el día cinco del proceso, donde el protocolo a seguir fue el pesaje, adición y mezcla manual en cada reactor, la decisión de agregar el componente fue tomada debido al comportamiento evidenciado en las temperaturas monitoreadas diariamente ya que la finalidad de la investigación fue realizar la adición del biochar en la fase termófila. En la Figura 2 se expone la distribución de los reactores en el sitio dispuesto.

### Figura 2.

*Configuración del montaje experimental*



### 3.3 Medición de parámetros

Los parámetros medidos para evaluar y comparar los dos experimentos fueron: temperatura, pH, humedad, sólidos volátiles, fitotoxicidad, y conductividad eléctrica (CE). El seguimiento comenzó una vez se realizó el montaje. La temperatura fue medida diariamente, el pH al igual que la conductividad eléctrica, humedad y los sólidos volátiles, fueron medidos tres veces por semana durante las dos primeras semanas y luego una vez por semana hasta el final del seguimiento (Joya Rangel et al., 2022). Para cada uno de los parámetros se realizó el promedio del tratamiento con su réplica, para de esta manera facilitar su análisis.

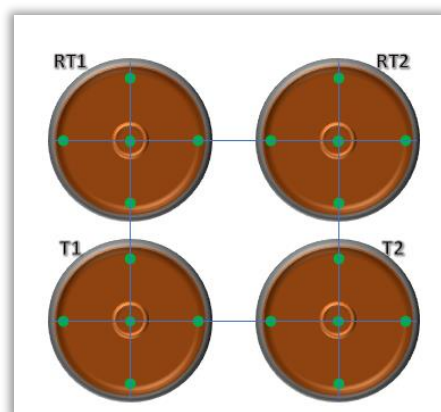
Respecto al volteo, este se realizó de acuerdo con los cambios de la temperatura (fase termófila) y para el resto del proceso cada ocho días. La influencia del volteo en las fases de enfriamiento y maduración ayuda a homogeneizar el material y evitar la compactación (Hernández Cruz et al., 2023); este se desarrolló manualmente sobre un plástico para cada uno de los reactores.

### 3.3.1 Temperatura

Este parámetro se midió por medio de un termómetro digital (HANNA instruments, modelo HI 935005N) equipado con una sonda de 49 cm de largo de los cuales se tomaba la medida a una profundidad de 28 cm en los puntos mostrados en la Figura 3. En las dos primeras semanas se tomó la temperatura dos veces al día, en las siguientes semanas se tomó una vez al día en hora de la mañana exceptuando los días en lo que se realizaba volteo.

#### Figura 3.

*Puntos en la toma de la temperatura*



### 3.3.2 pH

El protocolo de medición se basó en la preparación de una solución en un vaso precipitado de 50 mL, añadiendo 1 g de la muestra más 10 mL de agua destilada (relación 1:10), dejando reposar por al menos 20 min. Para realizar la toma de esta medida se sumergió en la solución un electrodo del pH-metro (Mettler Toledo modelo SevenCompact pH/Ion S220).

### 3.3.3 Conductividad eléctrica

El protocolo de preparación de las muestras es el mismo que el pH y su medición se realizó con un potenciómetro (Mettler Toledo modelo SevenGo Duo pro), sumergiendo el electrodo en la solución.

### 3.3.4 Humedad

Se midió utilizando la técnica de gravimetría, cuyo proceso consistió en pesar el crisol (forma media de 40 mm), tomar una pequeña cantidad de la muestra en el recipiente y pesarla, para luego ser llevada a un horno (Binder) a 105 °C por al menos 12 h y finalmente volver a pesar el contenido restante en una balanza analítica. La Ecuación 1 se utilizó para determinar contenido de humedad de cada muestra, expresando su valor como porcentaje.

$$\%H = \frac{P_{mh} - P_{ms}}{P_{mh} - P_c} * 100 \quad (\text{Ec.1})$$

Donde;

$P_{mh}$ =Peso de la muestra húmeda (g)

$P_{ms}$ =Peso de la muestra seca (después del horno de 105°C) (g)

$P_c$ =Peso del crisol (g)

Debido a la gran influencia que tiene la humedad en la actividad microbiana presente en el compostaje y debido a que su valor recomendado está entre 40% y 60% (Reyes Torres et al., 2018), hubo la necesidad de ajustar la humedad de los reactores que presentaron valores cercanos al límite inferior con la Ecuación 2, tomando el 48% como el porcentaje de humedad que se deseaba alcanzar.

$$\text{Humectación} = (F_{ad} - F_{ap}) * \frac{P_{tc}}{D_a} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde;

Fad=Fracción de agua deseada (%)

Fap=Fracción de agua presente en la muestra (%)

Ptc= Peso total compostaje (g)

Da= Densidad del agua (g/L)

### 3.3.5 Sólidos volátiles

Se midió utilizando la técnica de gravimetría calcinando la muestra, cuyo proceso consistió en tomar la muestra usada para cuantificar la humedad y llevarla a una mufla (ACEQ modelo MFR-2015) a 550 °C por al menos 2 h, luego de dejar enfriar y proceder a pesar en la balanza analítica. Este parámetro se determinó mediante la Ecuación 3, expresando su valor como porcentaje.

$$\%SV = \frac{Pms - Pmc}{Pmh - Pc} * 100 \quad (\text{Ec.3})$$

Donde;

Pmh=Peso de la muestra húmeda (g)

Pms=Peso de la muestra seca (después del horno de 105°C) (g)

Pmc=Peso de la muestra calcinada (después de la mufla a 550°C) (g)

Pc=Peso del crisol (g)

### 3.3.6 Fitotoxicidad

Una de las características de importancia para el compostaje es la presencia o ausencia de sustancias fitotóxicas, por lo cual se realizó la medición de este parámetro con el fin de conocer la presencia de sustancias orgánicas o inorgánicas que puedan ser tóxicas para la planta (Epstein, 1929). El proceso implementado para la medición de este parámetro consistió en realizar una

solución con relación 1:10 de la muestra en agua destilada y se dejó reposar por al menos 20 min, se esterilizó una caja Petri ubicando en ella 10 semillas de rábano (*Rhaphanus sativus*) sobre un papel filtro y se depositó 10 mL de la solución, para finalmente recubrirla con papel aluminio y almacenarla en una cámara de germinación por cinco días a temperatura ambiente; este proceso se realizó por cada una de las muestras y cada una de ellas se realizó por triplicado. Debido a la necesidad de utilizar las Ecuaciones (4,5,6) (Teresa Varnero et al., 2007) , se realizó la siembra de una muestra “blanco” por triplicado, la cual consistía en realizar el mismo proceso, pero solo con la implementación de agua destilada.

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en la solución}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el blanco}} * 100 \quad (\text{Ec.4})$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación de la raíz en la solución}}{\text{Elongación de la raíz en el blanco}} * 100 \quad (\text{Ec.5})$$

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde;

PGR = Porcentaje de germinación relativo

CRR = Crecimiento de raíz relativo (cm)

Para el análisis de este parámetro se siguió el siguiente criterio: para valores  $IG \leq 50\%$  significaría una elevada presencia de sustancias fitotóxicas, si  $50\% < IG < 80\%$  denotaría una presencia moderada de estas sustancias, en cuanto al  $IG \geq 80\%$  determinaría la ausencia o bajas concentraciones de sustancias fitotóxicas (Zucconi et al., 1981).

### 3.4 Análisis fisicoquímico y estadístico

#### 3.4.1 Caracterización fisicoquímica

Para la medición del carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), se tomaron 3 muestras: una al inicio del proceso (fase mesofílica), la segunda en el día 20 (fase de enfriamiento) y la tercera en el día 41 (fase de maduración); las muestras se enviaron al laboratorio GEIM de la Universidad de Antioquia para su análisis. Adicionalmente, se tomó una muestra del producto final después de realizar el tamizaje del compost obtenido utilizando un tamiz Núm. 35 ASTM (0.5 mm) como lo estipula la norma (NTC 5167) (ICONTEC, 2011).

Las muestras fueron analizadas siguiendo los métodos descritos en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 y se compararon las características obtenidas con los estándares presentes para productos utilizados como fertilizantes y/o enmiendas de suelos. Los parámetros medidos en el producto final fueron: pH, CE, NT, COT, PT, KT y una prueba de autocalentamiento (PA); con estos parámetros se analizó la calidad del producto final obtenido y la influencia de la adición del biochar en el mismo. En la Tabla 2 se indica los métodos de medición de los parámetros previamente mencionados.

**Tabla 2.**

*Métodos usados en la caracterización del producto final*

Parámetros	Unidades	Método/técnica
pH	-	pHmetro
Conductividad eléctrica (CE)	ms/cm	Potenciométrico
Nitrógeno total (NT)	%	Kjeldahl
Carbono orgánico total (COT)	%	Walkley-Black
Fósforo total (PT)	%	Mineralización por vía seca
Potasio total (KT)	%	Mineralización por vía seca
Prueba de autocalentamiento (PA)	°C	Ensayo de Rottegrade

*Nota.* Los métodos presentados en la tabla se tomaron de la NTC 5167 (ICONTEC, 2011) y la NTC 370 (ICONTEC, 1997).

Para el análisis del producto final se empleó una prueba de autocalentamiento para conocer la estabilidad del compost maduro, la cual consistió en la disposición del material final en un vaso isotherm (Umwelt Elektronik) y se monitoreó su temperatura por cinco días dos veces al día.

### ***3.4.2 Análisis estadístico***

Implementando el software estadístico MINITAB® (21.4.1.0) se realizó un análisis de varianza (ANOVA de un solo factor) de los parámetros monitoreados durante el proceso de compostaje con el fin de saber si existía diferencia significativa entre los dos tratamientos de la investigación; tomado como guía la hipótesis nula (todas las medias son iguales) y el valor p, donde si  $p < 0.05$  la hipótesis nula es falsa y existen diferencias significativas, por lo tanto, si  $p > 0.05$  la hipótesis nula es verdadera y no hay diferencias significativas. Otra de las herramientas empleadas para el análisis fue Excel® versión 2309, en el cual se registraron todos los datos recolectados y se realizó la esquematización de estos.

## **4. Resultados y análisis de resultados**

### **4.1 Efecto de la incorporación del biochar sobre los parámetros operacionales**

#### ***4.1.1 Temperatura***

Uno de los parámetros más importantes en el proceso de compostaje es la temperatura, ya que tiene un impacto en la tasa de degradación de la materia orgánica y la cantidad de patógenos, donde a través de sus valores se puede definir la fase en la que se encuentra el proceso (Behera & Samal, 2022). En la Tabla 3 se sintetizan los datos obtenidos a través del desarrollo de la investigación, así como la temperatura para ambos tratamientos, observando las fases típicas del proceso de compostaje (i.e., mesófila, termófila, enfriamiento y maduración).

**Tabla 3.***Recopilación de las fases del proceso*

Parámetros	Valor	
	T1	T2
Duración fase (días)	Mesófila	2
	Termófila	4
	Enfriamiento	14
	Maduración	33
Tmax (°C)	54.2	49.3

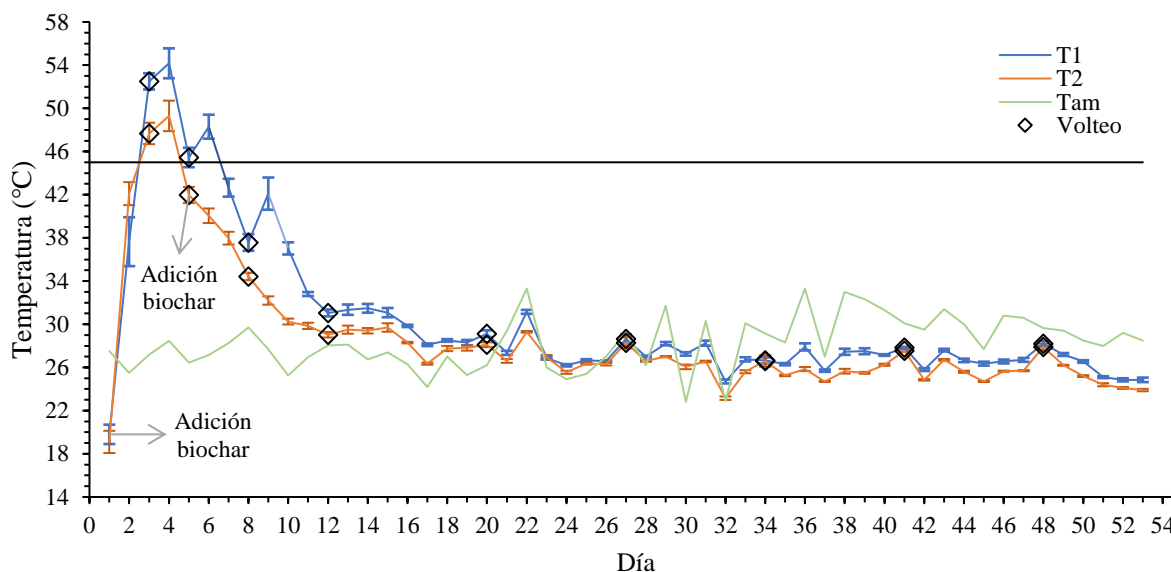
*Nota.* Tmax=Temperatura máxima.

En la Figura 4 se evidencia el comportamiento de las temperaturas en los tratamientos T1 y T2. Al inicio del proceso los dos tratamientos incrementan sus temperaturas, comportamiento característico de la fase mesófila en donde se descomponen moléculas de fácil degradación que se libera energía en forma de calor, lo que conlleva al crecimiento de los microorganismos termófilos pasando así a la fase termofílica (Barrena Gómez, 2006). Las temperaturas mayores a 45 °C (termofílicas) (Oviedo-Ocaña et al., 2014) se alcanza para ambos tratamientos en el día tres, presentándose para T1 una temperatura de 52.5 °C y una duración de 4 días, coincidiendo con investigaciones previas realizadas con biochar (Hernández Cruz et al., 2023), mientras que para T2 su temperatura fue de 47.7 °C y una duración de 2 días.

Se evidenciaron fluctuaciones en el T1 para los días 4, 6 y 9 los cuales tiene como característica común ser posteriores al volteo, esto debido a la renovación de oxígeno que se obtiene (Oviedo-Ocaña et al., 2014) y la homogeneización del material a compostar (Getahun et al., 2012), lo que incentiva la activación de los microorganismos presentes y así el aumento en la temperatura.

**Figura 4.**

*Comportamiento de las temperaturas durante el proceso de co-compostaje*



Tomando en cuenta que la fase termófila se conoce como la fase donde ocurre la higienización del material presente en el proceso de compostaje, y de acuerdo con los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (2003), en la cual se estipula una temperatura de 40 °C y una duración de 5 días como el proceso para reducir significativamente los patógenos, se concluye que ambos tratamientos cumplieron favorablemente con este requisito.

La adición del biochar al T2 realizada en el día cinco no presentó un cambio en el comportamiento de la temperatura, ya que esta se encontraba disminuyendo y continuó con dicho comportamiento después de realizar la incorporación, se considera que esto sucedió porque el proceso estaba iniciando la fase de enfriamiento, la cual se caracteriza por bajar la temperatura del proceso a medida que se van agotando los componentes de fácil degradación (Guo et al., 2012), al no existir componente que degradar no fue posible la activación microbiana lo que justifica la ausencia de un cambio en el comportamiento de la temperatura con la adición del biochar al proceso; la

duración de esta fase en el T2 fue de 16 días. Para el T1 en el día siete se inició la fase de enfriamiento con la disminución de su temperatura y una duración de 14 días.

En cuanto a la fase de maduración, la cual se desarrolla a temperatura ambiente (Barrena Gómez, 2006), dio inicio en el día 21 hasta el día 53, obteniendo una duración de 33 días. Para el desarrollo de esta fase la temperatura ambiente del lugar donde se desarrolló la investigación se caracterizó por la presencia de picos lo que influyó las fluctuaciones en la temperatura que se reflejan al final del proceso de compostaje. Por último, la duración total del proceso fue de 53 días, tomando este día como el día de desmontaje.

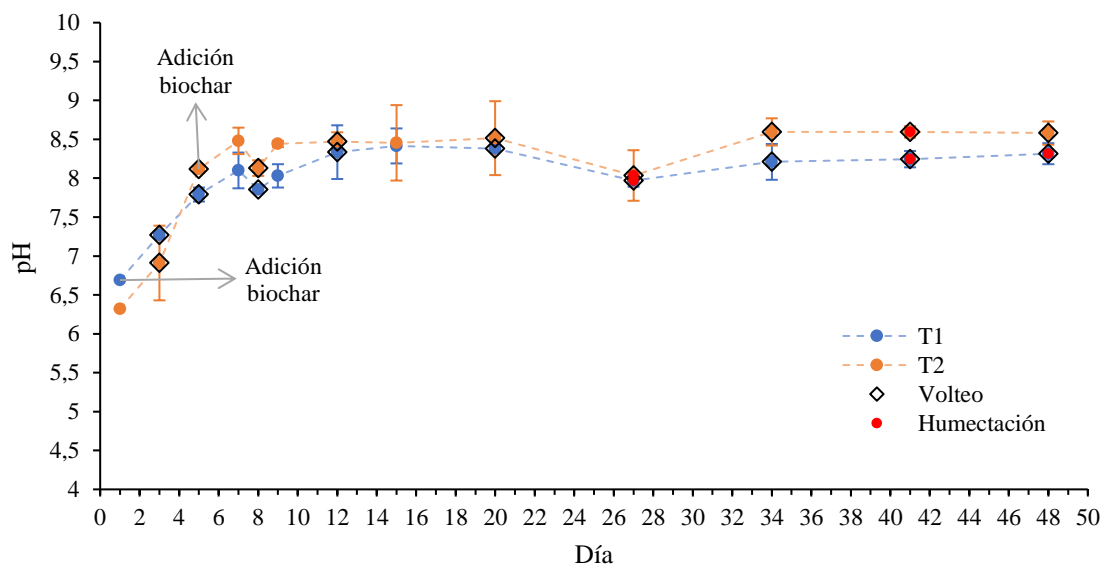
Para realizar la comparación de estos tratamientos se implementó un análisis estadístico ANOVA, donde para la fase mesófila se obtiene un valor  $p=0.909$ , para la fase termófila un valor  $p=0.620$  y para el proceso en general un valor  $p=0.183$ , y bajo el criterio de significancia ( $p>0.05$ ) no existe diferencia significativa, se concluye que estadísticamente no existe diferencias significativas en el comportamiento de las temperaturas de los dos tratamientos durante todo el proceso.

#### **4.1.2 pH**

Este parámetro puede ser un índice indirecto de la aireación, debido a que si en el proceso se presentan condiciones anaerobias se presentaría liberación de ácidos orgánicos por lo cual el pH decrecería (Bueno Márquez et al., 2008); también puede ser un indicador de la evolución del proceso (Barrena Gómez, 2006). En la Figura 5 se expone el comportamiento del pH para cada tratamiento monitoreado durante todo el proceso de co-compostaje.

**Figura 5.**

*Comportamiento del pH durante el proceso de co-compostaje*



Inicialmente el comportamiento de T1 y T2 fue ligeramente ácido, esto se puede justificar debido a la degradación previa de algunos materiales (RAP y RANP) que se mantuvieron en almacenamiento por nueve días antes del inicio del montaje del proceso (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

Posteriormente, el T1 aumentó su pH a partir del día tres hasta el siete lo cual se debe a la acción del biochar de captar nitrógeno, lo que conlleva a una acumulación de amoníaco (Liu et al., 2023). Para el T2 en el día tres (fase termófila) el pH aumentó gradualmente, esto como consecuencia del aumento en la temperatura lo que conlleva a la generación de microorganismos que descomponen la materia orgánica causando la liberación de amoníaco (Bueno Márquez et al., 2008); para el día cinco se observa un aumento y superación de los valores del pH del T2 con respecto a los valores del T1, esto como consecuencia de la adición del biochar al proceso, ya que este se caracteriza por tener un pH ligeramente alcalino (Behera & Samal, 2022).

En general, el T2 obtuvo valores más altos durante todo el proceso, pero al igual que el T1 se mantuvo el pH en un rango adecuado (8 - 9 unidades) (ICONTEC, 2011) gracias al efecto de la

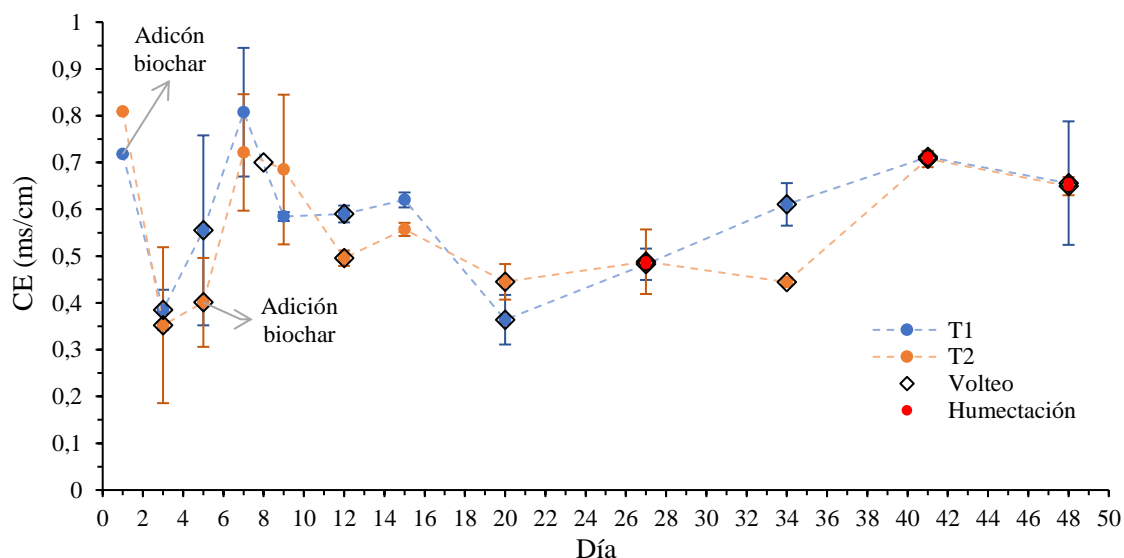
adición del biochar que ayudó a neutralizarlo. Estadísticamente no hubo diferencias significativas ( $p>0.05$ ).

#### 4.1.3 Conductividad Eléctrica (CE)

Este parámetro es un índice del contenido en sales solubles presentes en una muestra, de esta forma se puede decir que repercute en la salinidad presente en la mismas, dando lugar en algunos casos a problemas radiculares o casos de estrés hídrico (Méndez Fernández, 2017). Además, este indicador proporciona información relevante sobre la cantidad de iones presentes, su estabilidad y su potencial fitotóxico para el crecimiento de las plantas (Soobhany, 2018). En la Figura 6 se presenta su comportamiento obtenido en el proceso de co-compostaje realizado.

**Figura 6.**

*Comportamiento de la conductividad eléctrica durante el proceso de co-compostaje*



Al inicio del proceso se observaron valores altos para la CE en ambos tratamientos con respecto a los valores obtenidos en el resto del proceso, esto debido a la presencia de sales solubles (sales fosfatos) aportados por la RF (Oviedo-Ocaña et al., 2021). Para el día tres se evidencia una disminución del valor de este parámetro, en cuanto al T1 puede ser debido a una elevada actividad

microbiana, de la cual se obtiene como resultado la generación de ácidos orgánicos pero debido a la porosidad y la capacidad de absorción del biochar, se obtiene una mejora en la conductividad eléctrica y la estructura del compost, para de esta forma aportar en la mejora de la circulación de iones en el medio (Hernández Cruz et al., 2023); con respecto al T2 la disminución puede ser atribuida a una mayor liberación de sales minerales e iones de amonio, a través de la descomposición de la materia orgánica (Oviedo-Ocaña et al., 2014).

En general, el aumento en los valores de CE se debe a la pérdida de masa, liberación de sales minerales como iones fosfato y amonio, y de forma global a la acumulación de los ácidos orgánicos (Abdi et al., 2023); en relación con la disminución de este parámetro se asocia a la volatilización del amoniaco, precipitación y lixiviado de sales minerales (Gong et al., 2017).

En cuanto al comportamiento para la parte final del proceso se evidencia un incremento en los valores, esto debido a la degradación del material como consecuencia de los procesos de humificación y liberación de nutrientes (Oviedo-Ocaña et al., 2021). Otra hipótesis que podría explicar este comportamiento es la acción de retención del biochar, el cual al realizar la humectación y por ser un elemento finito puede conseguir liberar parte de los componentes acumulados (Shackley et al., 2010).

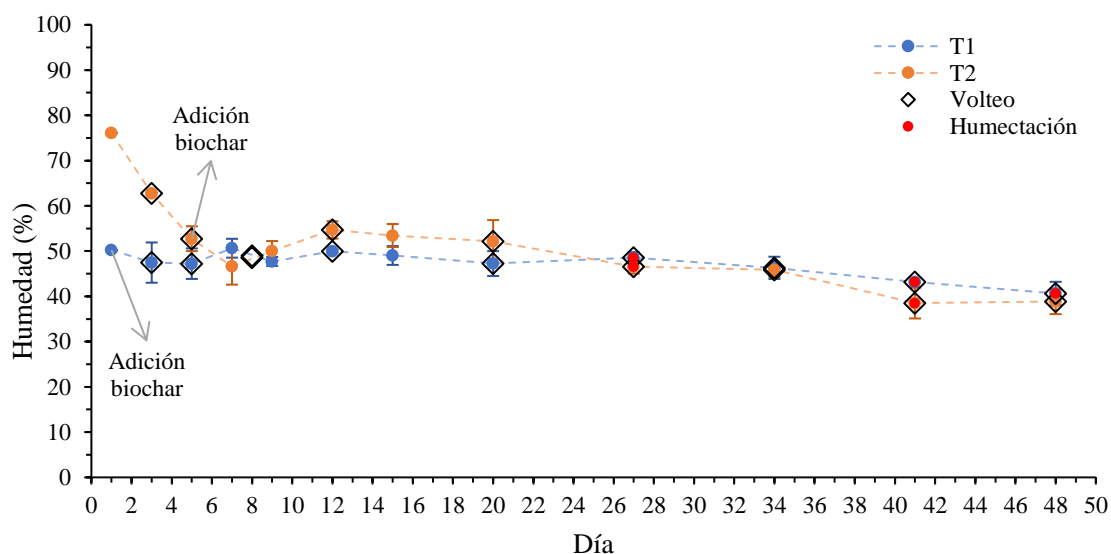
Finalmente, todos los valores se mantuvieron por debajo del valor recomendado por el Boletín Oficial del Estado (BOE, 2013) ( $< 2 \text{ ms/cm}$ ) para que la salinidad no perjudique el crecimiento de la planta (Oviedo-Ocaña et al., 2014). En cuanto a los valores obtenidos por los tratamientos durante el compostaje no tienen diferencias significativas ( $p=0.635$ ) según el análisis estadístico abordado.

#### 4.1.4 Humedad

Durante el proceso de compostaje la humedad es un medio de transporte para las sustancias solubles lo que permite que los microorganismos descompongan los residuos orgánicos ayudando así a mantener la actividad microbiana y facilitando la transformación de las moléculas orgánicas, para finalmente generar un producto de manera efectiva (Bueno Márquez et al., 2008; Reyes Torres et al., 2018). En la Figura 7 se indica el comportamiento de este parámetro.

**Figura 7.**

*Comportamiento de la humedad durante el proceso de co-compostaje*



Al inicio del proceso, el T2 presenta un alto contenido de humedad, esto debido a la presencia de frutas y vegetales de los RAP y RANP (Oviedo-Ocaña et al., 2014); sin embargo al realizar la adición del biochar el comportamiento de este tratamiento cambia, como consecuencia de la acción característica de este aditivo de modular el contenido de humedad y mejorar la capacidad de retención de agua (Behera & Samal, 2022), como se evidencia en el comportamiento del T1 desde el inicio; finalmente se observa un comportamiento estable a lo largo del proceso de ambos tratamientos.

Si se tiene presente un contenido de humedad relativamente alto se puede relacionar con la ocupación de agua en los espacios vacíos donde estaba el aire, por lo cual los microorganismos aeróbicos no pueden recibir oxígeno (Behera & Samal, 2022), por este motivo es necesario mantener este parámetro en un rango óptimo (40% - 60%) (Malinowski et al., 2019).

Con el fin de mantener este rango se realizó la humectación de los reactores según la necesidad de cada uno, la cantidad total añadida para T1 y T2 fue de 4.73 y 1.85 litros respectivamente, se observa una mayor cantidad de agua para el T1 debido a las altas temperaturas alcanzadas por este tratamiento y la duración de estas, a pesar de la acción reguladora que caracteriza al biochar.

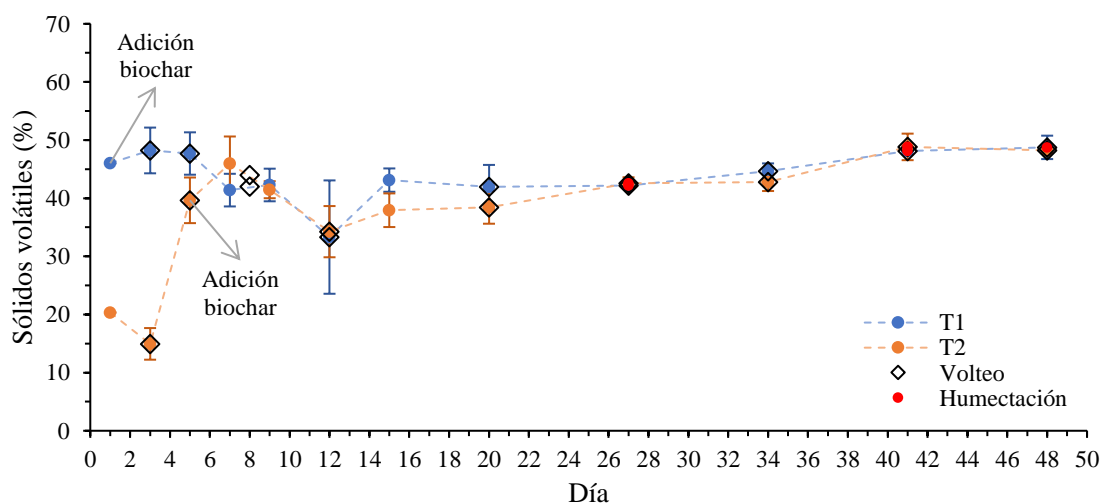
Respecto al análisis estadístico realizado a este parámetro, no existe diferencia significativa en el comportamiento de los dos tratamientos ( $p= 0.188$ ).

#### 4.1.5 Sólidos Volátiles

La cuantificación de este parámetro es utilizada para evaluar la madurez y eficiencia del proceso de degradación para asegurar que se haya producido una descomposición adecuada de la materia orgánica (Oviedo-Ocaña et al., 2015). Se presenta el comportamiento en la Figura 8.

**Figura 8.**

*Comportamiento de los sólidos volátiles durante el proceso de co-compostaje*



Tomando este parámetro como un índice de la pérdida total de la materia orgánica con el tiempo (Soobhany, 2018), se puede argumentar que el comportamiento del T1 en los días 3 y 5 (fase termófila) indica una alta degradación de la materia por lo cual una pérdida de la misma en forma de gases, mientras que el T2 denota un menor valor con respecto al T1, pero al realizar la adición del biochar en el día 5, se evidencia el incremento en los sólidos volátiles presentes en la muestra, gracias al aporte que realiza este componente a base de carbono (Lehmann & Joseph, 2009).

Posteriormente ambos tratamientos entran en la fase de enfriamiento y se observa una disminución en el valor de los sólidos volátiles hasta el día 12 del proceso, este comportamiento se toma como resultado de la finalización de la degradación de los compuestos lábiles.

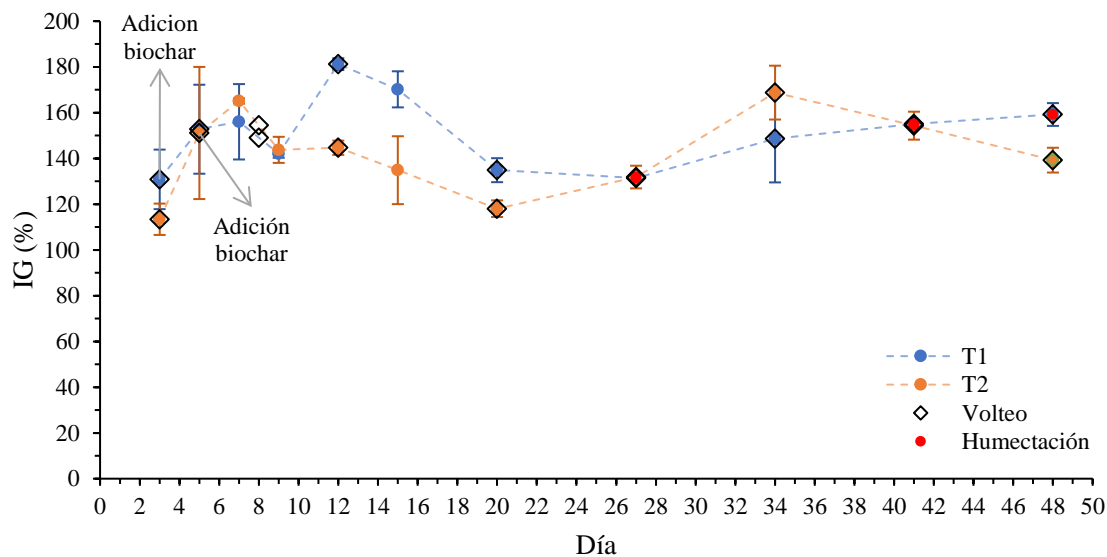
Con respecto al comportamiento restante de los tratamientos se considera que el crecimiento de los valores se debe a la estructura aromática del biochar la cual le aporta resistencia a la degradación lo que indicaría una baja pérdida de este componente (Behera & Samal, 2022); por ende, puede aumentar los valores de sólidos volátiles presentes en las muestras. Tras el análisis estadístico para este parámetro, se concluye que no existen diferencias significativas ( $p=0.079$ ) en ambos tratamientos durante el proceso.

#### ***4.1.6 Fitotoxicidad***

Parámetro mediante el cual se mide la madurez del compost y la presencia de sustancias tóxicas en el mismo, para su cuantificación se han utilizado diversos métodos de los cuales el índice de germinación (IG) es el que mayor alcance ha tenido (Teresa Varnero et al., 2007). En la Figura 9 se observa el comportamiento de este parámetro a lo largo del proceso de co-compostaje.

**Figura 9.**

*Comportamiento del índice de germinación durante el proceso de co-compostaje*



El índice de germinación es uno de los indicadores más completos para definir el comportamiento fitotóxico del compost, debido a que para su medida tiene en cuenta el porcentaje de germinación relativo (PGR) y el crecimiento relativo de raíces (CRR) (Zucconi et al., 1981).

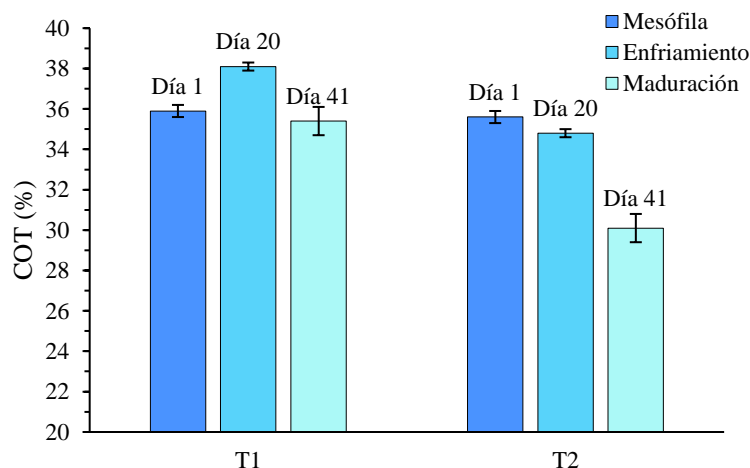
Teniendo en cuenta los indicadores expuestos en la metodología de este parámetro con anterioridad, a pesar de las variaciones presentes en su comportamiento, su respuesta a la fitotoxicidad fue favorable, ya que los valores de respuesta siempre fueron superiores a 110%; lo cual demuestra una correcta higienización del proceso. Otro de los parámetros que afecta la presencia de sustancias fitotóxicas es la conductividad eléctrica, la cual cumplió con los estándares establecidos por el Boletín Oficial del Estado (BOE, 2013), con valores muy por debajo de los recomendados, teniendo concordancia en el comportamiento de estas dos variables. Finalmente, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.230$ ) entre ambos tratamientos.

#### 4.1.7 Carbono orgánico total (COT)

Los microorganismos aprovechan el contenido de carbono para obtener energía y, al hacerlo, generan calor como subproducto (Hernández Cruz et al., 2023). En la Figura 10 se denota la tendencia del COT durante el proceso, en la cual en la fase mesófila los valores para los T1 y T2 fue de 35.9% y 35.6 % respectivamente, donde la diferencia observada se puede justificar a la incorporación del biochar en una fase diferente de cada tratamiento.

#### Figura 10.

*Comportamiento del COT en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje*



Respecto al comportamiento denotado de la muestra tomada en la fase de enfriamiento, se evidenció un aumento del contenido de COT para T1 con respecto a la mesófila, esto debido al efecto que tiene el biochar en la duración de la fase termofílica, logrando que el trabajo realizado por los microorganismos en la descomposición de la materia orgánica durara más tiempo, y como consecuencia obtener una baja actividad microbiana o ausencia de los mismos durante la fase de enfriamiento, razón por la cual el contenido de carbono es mayor en el T1 que en el T2 (38.1% y 34.8% respectivamente). Una justificación adicional para la disminución en el valor del T2 es el momento de la adición del biochar para el mismo, ya que esto ocurrió en la fase de enfriamiento

por lo cual la influencia de su efecto no tuvo incidencia en la fase termofílica del proceso, por ende, la actividad microbiana podría encontrarse un poco más activa que para el T1 al momento de la toma de la muestra.

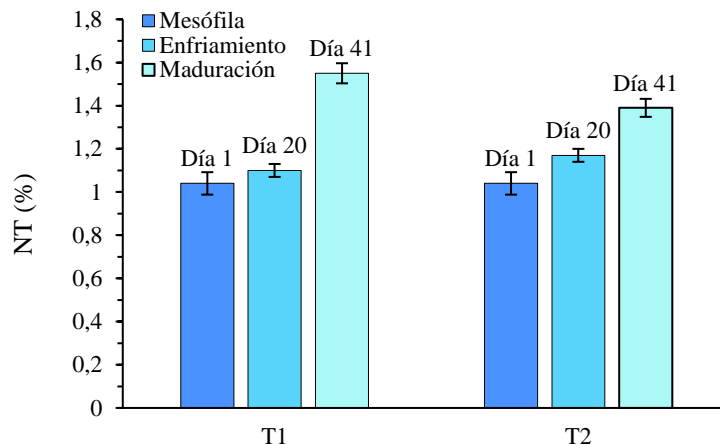
Con respecto a la muestra tomada en la etapa de maduración, cuya característica es desarrollarse a temperatura ambiente con la ausencia de componentes de fácil degradación y por ende una baja actividad microbiana (Barrena Gómez, 2006). Obteniendo contenidos de COT de 35.4% para el T1 y de 30.1% para el T2, respuesta a consecuencia de la capacidad de retención del biochar, el cual al realizar la humectación pudo liberar parte de carbono almacenado y dar lugar a la disminución del contenido del mismo (Shackley et al., 2010). Sin embargo, el comportamiento del proceso de ambos tratamientos no tuvo diferencias significativas,  $p=0.194$ .

#### ***4.1.8 Nitrógeno total (NT)***

El nitrógeno en el compostaje cumple la función de ser un macronutriente para el crecimiento de células microbianas, lo que conlleva a que los microorganismos experimenten ciclos adicionales de consumo de carbono. En cuanto a la mineralización del contenido de NT en los residuos de alimentos (RANP y RAP), factores como el tipo y la forma de los residuos son los que influyen su comportamiento (Saldarriaga Elorza, 2009). En la Figura 11 se muestra el comportamiento de este parámetro.

**Figura 11.**

*Comportamiento del NT en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje*



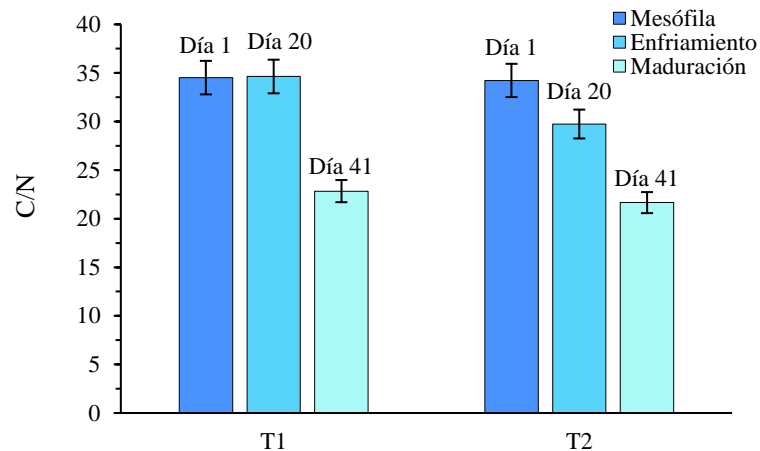
El comportamiento del NT para las tres muestras tomadas durante el proceso evidencia una tendencia creciente para ambos tratamientos, respuesta esperada debido a los resultados obtenidos en el anterior estudio realizado por Hernández Cruz et al. (2023), quienes justifican dicho comportamiento debido a la acción del biochar de reducir la pérdida de amoníaco por medio de la modulación de la humedad en el proceso. Con respecto a su análisis estadístico, se concluye que no existen diferencias significativas,  $p=0.883$ .

#### **4.1.9 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)**

La relación C/N es una medida que expresa la proporción de C por unidad de N presente en un material. Esta relación es un indicador del progreso del proceso, ya que el C proporciona energía a los microorganismos al activar sus procesos metabólicos, mientras que el N es esencial para la síntesis de proteínas (Mendoza Juárez, 2012). En la Figura 12 se evidencia la evolución de este parámetro en los tratamientos.

**Figura 12.**

*Comportamiento de la relación C/N en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje*



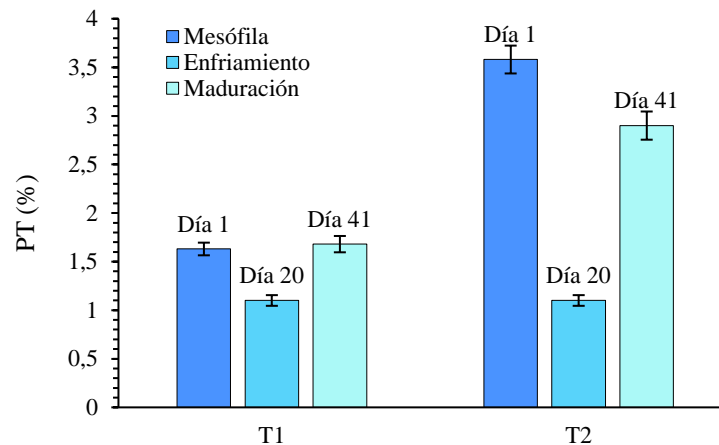
Según Garg & Tothill (2009) para que un proceso de compostaje sea eficaz es necesaria una relación C/N entre 20 y 40, criterio que cumplieron ambos tratamientos durante todo el proceso. Con respecto al comportamiento en la muestra intermedia para el T1 se evidenció un pequeño aumento en su valor, esto puede atribuirse a que la mineralización del N es mayor con respecto a la del C. En cuanto al resto de comportamiento en ambos tratamientos fue concordante y dentro de los valores sugeridos, aplicando el análisis estadístico se obtuvo como resultado que no hay diferencias significativas,  $p=0.713$ .

#### **4.1.10 Fósforo total (PT)**

En la Figura 13 se da a conocer el comportamiento del PT, el cual es un elemento esencial en la formación de sustancias celulares ricos en energía, siendo necesario para el proceso metabólico de los microorganismos; por otro lado, es un nutriente de gran importancia, después del carbono y el nitrógeno, ya que es indispensable que esté presente en cantidades mínimas para garantizar que el proceso se desarrolle adecuadamente (Bueno Márquez et al., 2008).

**Figura 13.**

*Comportamiento del PT en las fases mesófila, enfriamiento y maduración del proceso de co-compostaje*



Se observa una disminución del contenido de fósforo entre la muestra tomada en la fase mesófila del proceso con la tomada en la fase de enfriamiento, esto como consecuencia de la adición de la roca fosfórica debido a que su efecto es el de aumentar de las bacterias solubilizadoras, lo cual aumenta la presencia del fósforo en el compost (Galindo Castro et al., 2018) y al realizar los volteos puede que parte del mismo se volatilice.

Para la fase de maduración ocurre un aumento en los valores para el T1 de 1.68% y para el T2 de 2.9%; este cambio podría deberse al aumento del contenido del N, ya que en cuanto mayor sea la presencia de este, implica un aumento en los microorganismos que descomponen el fósforo, influyendo así en el aumento del contenido del mismo en el sustrato (Astuti Hidayati et al., 2008); otro factor al que se le puede atribuir este aumento es a la humectación realizada, debido a la capacidad de retención del biochar y los nutrientes disponibles en forma de cenizas dentro del mismo en donde, al implementar este proceso se puede haber liberado parte de los nutrientes presentes en el material (Shackley et al., 2010).

Finalmente, con el análisis estadístico se concluye que no hubo diferencias significativas de los tratamientos,  $p=0.238$ .

## 4.2 Diferencias en los parámetros de calidad del producto obtenido de la adición de biochar en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.

En la Tabla 4 se encuentran registrados los valores de los parámetros fisicoquímicos analizados en el producto final obtenido de los T1 y T2, los cuales se usaron para determinar la calidad del compost elaborado.

Los parámetros medidos al producto final se basaron principalmente en los estipulados en la NTC 5167; sin embargo, con el fin de conocer su aprobación por distintas normas de diversos países se efectuó su comparación con algunas de ellas, tales como: NCh 2880, FAO y NMX.

**Tabla 4.**

*Parámetros fisicoquímicos de los productos finales*

Parámetro	T1	T2	NTC <sup>1</sup> 5167	NCh 2880 <sup>2</sup>		FAO <sup>3</sup>	NMX <sup>4</sup>
				Clase A	Clase B		
COT (%)	28.30	15.80	>15	-	-	-	≥ 10
NT (%)	1.91	1.47	>1	≥ 0.5	≥ 0.5	~1	>1< 3
C/N	14.82	10.78	-	≤ 25	≤ 30	>10<15	>15< 25
PT (%)	4.69	4.29	>1	-	-	>0.1<1	-
KT (%)	0.77	0.59	>1	-	-	>0.3<1	-
pH	6.87	7.29	>4<9	>5< 8.5	>5< 8.5	>6.5< 8.5	>6.7< 8.6
CE (ms/cm)	0.94	0.65	-	≤ 3	≤ 8	-	-
IG (%)	139.40	126.11	-	≥ 80	≥ 80	-	≥ 80
PA (°C)	26.48	26.83	-	≤ 20	≤ 20	Tam	>20< 25
TP (mm)	0.50	0.50	0.50	≤ 16	≤ 16	<16	≤ 30

*Nota.* PA=Prueba de autocalentamiento, TP=Tamaño de partícula, Clase A=Producto de alta calidad, Clase B=Producto de calidad intermedia, Tam=Temperatura ambiente; <sup>1</sup>(ICONTEC, 2011), <sup>2</sup>(INN, 2004), <sup>3</sup>(Román et al., 2013), <sup>4</sup>(COTEMARNAT, 2018).

Con respecto al COT, presentó valores para el producto final de 28.3% y 15.80% para T1 y T2 respectivamente, según NTC 5167 este debe encontrarse por encima del 15%, mientras que en la NMX este debe ser ≥10% lo que se podría concluir que ambos tratamientos cumplen con este requisito dispuesto por estas normas. Cabe resaltar que el T2 tuvo un menor contenido en

comparación con el T1, esto ocasionado por el tiempo de acción que tuvo del biochar en el proceso, debido a que su incorporación en el tratamiento fue después de su inicio y además no tuvo efecto en la fase termofílica de este proceso.

Para la Norma Chilena (INN, 2004) la relación C/N en el compost maduro se establece en valores  $\leq 30$  para clasificarse como un compost clase B (producto de calidad intermedia) y con valores  $\leq 25$  para clasificarse como un compost clase A (producto de alta calidad), siguiendo estos estándares el producto final obtenido de los dos tratamientos se cataloga como un producto de alta calidad; con respecto a las demás normas cumplen los requisitos, excepto para la NMX.

El contenido de N para ambos tratamientos cumplió con los requisitos mínimos estipulados por la NTC 5167 y demás normas, de acuerdo con la normatividad colombiana (ICONTEC, 2011) el contenido de cada uno de los nutrientes en el producto debe ser  $>1\%$ . Según Rihani et al. (2010) los valores de NT, PT y KT no deben ser inferiores al 1%, esto con el fin de mantener niveles mínimos de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo para garantizar el desarrollo saludable de las plantas y de esta forma asegurar la disponibilidad adecuada de nutrientes; teniendo en cuenta lo anterior y los datos obtenidos de los productos finales, se puede concluir que el contenido de PT para los tratamientos cumplió con este requisito, mientras que el contenido de KT se encontró por debajo del valor sugerido, incumpliendo así con los estándares establecidos.

El pH para el compostaje es un factor dinámico que está influenciado por los sustratos implementados para la producción de un compost de calidad, a medida que avanza el proceso este parámetro tiene la tendencia de estabilizarse en valores cercanos a la neutralidad (Román et al., 2013). Según la NTC 5167 el rango establecido para este parámetro está entre  $>4$  y  $<9$ , especificaciones que cumplen los productos obtenidos en este estudio, al igual que los valores estipulados para las demás normas.

Los compost obtenidos exhibieron valores de CE muy por debajo del límite estándar ( $< 3$  ms/cm) para un compost de alta calidad según la NCh 2880, de esta forma se podría deducir la capacidad de los productos finales para su implementación gran variedad de cultivos, ya que no representará problemas relacionado con el alto índice de salinidad que incurría en el crecimiento de las plantas (Méndez Fernández, 2017).

Un parámetro para la medición de la estabilidad del producto final es la prueba de autocalentamiento, la cual consiste en la implementación de un  $\Delta T$ , diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura ambiente. Según Brinton et al. (1995) compost con un  $\Delta T$  en el rango entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se les considera productos muy estables, con una clasificación de grado V (compost terminado); teniendo en cuenta lo anterior y conociendo que el  $\Delta T$  para T1 y T2 fue de  $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente, se pueden considerar los productos finales como materiales que cumplen con dicho requisito.

## 5. Conclusiones

- ✓ El tratamiento con adición de biochar al inicio del proceso (T1) mostró mayores temperaturas en la fase termofílica ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  más), una mayor duración de esta fase (4 días) en comparación con el tratamiento T2. Esto muestra que durante los primeros días del proceso el biochar contribuyó a generar un entorno favorable para el crecimiento microbiano y acelerar la tasa de degradación. La adición de biochar al día 5 del proceso no mostró ningún efecto significativo en las condiciones de degradación del proceso ni en el comportamiento de la temperatura. El tratamiento T1 mostró temperaturas superiores a T2 que puede indicar una mayor actividad biológica en este tratamiento.
- ✓ No se obtienen diferencias significativas en los análisis estadísticos de los parámetros operacionales tales como: pH, CE, IG, sólidos volátiles, humedad, fitotoxicidad, COT, NT,

C/N y PT por lo cual se concluye que la adición del biochar en el día cinco del proceso no presenta una mejora en comparación al ser adicionado al inicio de proceso.

- ✓ Para el análisis de los productos finales según los valores establecidos por la NTC 5167, los tratamientos se establecieron en el rango sugerido para los parámetros tales como COT, C/N, NT, PT, pH, CE, IG, PA y el tamaño de la partícula, obteniendo como resultados compost maduros de buena calidad sin diferencia evidente en los dos tratamientos.

### **6. Recomendaciones**

- Implementar la adición del biochar en el día tres del proceso, debido a que en varias investigaciones realizadas anteriormente y en este estudio, este día se da el inicio de la fase termofílica, en donde se alcanzan las temperaturas más altas y mayor actividad microbiana, por lo que este aditivo podría tener un mayor efecto.
- Realizar la medición de parámetros como pH, CE y oxígeno diariamente, para realizar una mejor comparación de estos datos y así facilitar su análisis, ya que para este estudio se queda con la incógnita del comportamiento de dichas variables en los días que no se realizó la toma.

### Referencias Bibliográficas

- Abdi, R., Shahgholi, G., Sharabiani, V. R., Fanaei, A. R., & Szymanek, M. (2023). Prediction compost criteria of organic wastes with Biochar additive in in-vessel composting machine using ANFIS and ANN methods. *Energy Reports*, 9, 1684–1695. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.001>
- Astuti Hidayati, Y., Harlia, E., & Marlina, E. T. (2008). *Analisis kandjtngaii N, P dan K pada lumpur hasil ikutan gasbio (sludge) yang terbuat dari feses sapi perah*.
- Banco Mundial, & Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio de Colombia. (2021). *Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo*.
- Barrena Gómez, R. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso* [Universitat Autònoma de Barcelona]. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5307/rbg1de1.pdf?sequence>
- Barthod, J., Rumpel, C., Paradelo, R., & Dignac, M. F. (2016). The effects of worms, clay and biochar on CO<sub>2</sub> emissions during production and soil application of co-composts. *SOIL*, 2(4), 673–683. <https://doi.org/10.5194/soil-2-673-2016>
- Behera, S., & Samal, K. (2022). Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting. *Energy Nexus*, 7, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100121>
- BOE. (2013). *Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506>
- Brinton, W. F., Evans, E., Droffner, M. L., & Brinton, R. B. (1995). A standardized Dewar test for evaluation of compost self-heating Dewar Test. *Biocycle* 36, 1–16.

- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2008). *Compostaje: Situación Actual y Perspectivas de Futuro. Factores que afectan al proceso de Compostaje* (F. Cabrera Capitán, Ed.). <https://digital.csic.es/handle/10261/20837>
- Castillo, M., Vergara, D., Leanne Urriola, M., Montes Castillo, K., Díaz Vergara, M., & Melo, E. (2021). Evaluación de la fitotoxicidad de abonos orgánicos comerciales usando semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y pepino (*Cucumis sativus*). *Periodicidad: Semestral*, 1(2), 2021.
- COTEMARNAT (Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). Dirección general de normas que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. In *NMX-AA-180-SCFI-2018*.
- Cuervo, L., Folch mallol, J., & Quiroz Castañeda, R. (2009). Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. *Bio Tecnología*, 13. [https://www.academia.edu/26149126/Lignocelulosa\\_Como\\_Fuente\\_de\\_Az%C3%BAcares\\_Para\\_la\\_Producci%C3%B3n\\_de\\_Etanol](https://www.academia.edu/26149126/Lignocelulosa_Como_Fuente_de_Az%C3%BAcares_Para_la_Producci%C3%B3n_de_Etanol)
- EPA (Environmental Protection Agency). (2003). *Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*.
- Epstein, E. (1929). *Industrial composting: environmental engineering and facilities management. Universidad Industrial de Santander UIS*.

- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). *Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo*.
- Gabhane, J., William, S. P., Bidyadhar, R., Bhilawe, P., Anand, D., Vaidya, A. N., & Wate, S. R. (2012). Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. *Biore-source Technology*, 114, 382–388. <https://doi.org/10.1016/J.BIOR-TECH.2012.02.040>
- Galindo Castro, L. A., Martínez Osorio, J. W., & Estrada Bonilla, G. Á. (2018). Compostaje enriquecido con fósforo como método de reaprovechamiento de los residuos orgánicos. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(11), 7–15. <https://doi.org/10.29018/ISSN.2588-1000VOL2ISS11.2018PP7-15>
- Garg, A., & Tothill, E. (2009). A Review of Solid Waste Composting Process-The UK Perspective. *Dynamic Soil, Dynamic Plant. Global Science Books*, 3(1), 57–63. [http://www.ecochem.com/t\\_compost\\_faq2.html](http://www.ecochem.com/t_compost_faq2.html)
- Getahun, T., Nigusie, A., Entele, T., Gerven, T. Van, & Bruggen, B. Van Der. (2012). Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 79–84. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2012.05.007>
- Gong, X., Li, S., Sun, X., Zhang, L., Zhang, T., & Wei, L. (2017). Maturation of green waste compost as affected by inoculation with the white-rot fungi *Trametes versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium*. *Environmental Technology*, 38(7), 872–879. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1214622>

- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., & Shen, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*, *112*, 171–178. <https://doi.org/10.1016/J.BIOR-TECH.2012.02.099>
- Hernández Cruz, J. A., Gómez Herreño, M. C., Domínguez Rivera, I. C., Ocaña Oviedo, E. R., Parra Orobio, B. A., & Soto Paz, J. (2023). Evaluation of Biochar as an Additive in the Co-Composting of Green Waste and Food Waste. *Sustainability* *2023*, *Vol. 15*, Page 7437, *15*(9), 7437. <https://doi.org/10.3390/SU15097437>
- Hernández Cruz, J. A., Gómez, M. C., Oviedo Ocaña, E. R., Parra Orobio, B. A., & Soto Paz, J. (2023). Efecto de la Adición del Biochar sobre las Condiciones del Proceso del Co-compostaje de Residuos Verdes y Residuos de Alimentos. In *Tesis*. Universidad Industrial de Santander.
- Hernández Gómez, A., Calderón, A., Medina, C., Sanchez Torres, V., & Oviedo Ocaña, E. R. (2021). Implementation of strategies to optimize the co-composting of green waste and food waste in developing countries. A case study: Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(19), 24321–24327. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08103-w>
- ICONTEC. (1997). *Norma Técnica Colombiana NTC 370. Abonos o fertilizantes. Determinación del nitrógeno total.*
- ICONTEC. (2011). *Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas del suelo.*
- INN (Instituto Nacional de Normalización). (2004). Norma Chilena Oficial, NCh 2880 Compost Clasificación. *Servicio Agrícola Ganadero (SAG).*

- Joya Rangel, L. F., Ojeda Barón, J. D., Oviedo Ocaña, E. R., Sánchez Torres, V., & Soto Paz, J. (2022). *Efecto de la adición de un inóculo bacteriano sobre el proceso y la calidad del producto del co-compostaje de residuos verdes y de residuos de alimentos*. Universidad Industrial de Santander.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement* (earthscan, Ed.).
- Liu, H., Awasthi, M. K., Zhang, Z., Syed, A., Bahkali, A. H., Sindhu, R., & Verma, M. (2023). Microbial dynamics and nitrogen retention during sheep manure composting employing peach shell biochar. *Bioresource Technology*, 386, 129555. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2023.129555>
- Liu, X., Xie, Y., & Sheng, H. (2023). Green waste characteristics and sustainable recycling options. In *Resources, Environment and Sustainability* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100098>
- Ma, C., Lo, P. K., Xu, J., Li, M., Jiang, Z., Li, G., Zhu, Q., Li, X., Leong, S. Y., & Li, Q. (2020). Molecular mechanisms underlying lignocellulose degradation and antibiotic resistance genes removal revealed via metagenomics analysis during different agricultural wastes composting. *Bioresource Technology*, 314, 123731. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123731>
- Malinowski, M., Wolny-Kołodka, K., & Vaverková, M. D. (2019). Effect of biochar addition on the OFMSW composting process under real conditions. *Waste Management*, 84, 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.011>
- Méndez Fernández, A. (2017). *Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje*. Universidad de Valladolid.

- Mendoza Juárez, M. A. (2012). *Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura*. Universidad de Piura.
- Monteiro, C., & Cannon, G. (2012). *El gran tema en nutrición y salud pública es el ultra-procesamiento de alimentos*. Universidad de São Paulo.
- Morris, J., Scott Matthews, H., & Morawski, C. (2013). Review and meta-analysis of 82 studies on end-of-life management methods for source separated organics. *Waste Management*, 33(3), 545–551. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.004>
- Muniyasamy, S., Anstey, A., Reddy, M. M., Misra, M., & Mohanty, A. (2013). Biodegradability and compostability of lignocellulosic based composite materials. *Journal of Renewable Materials*, 1(4), 253–272. <https://doi.org/10.7569/JRM.2013.634117>
- Murillo Montoya, S. A., Mendoza Mora, A., & Fadul Vásquez, C. J. (2019). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *La Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustrial*, 7(1), 58–68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Daza-Torres, M., Marmolejo-Rebellón, L., Osorio-Ortiz, Á., & Torres-Lozada, P. (2013). *Influencia de la incorporación de pasto estrella como material de soporte ( Cynodon Plectostachyus ) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal Influence of using star grass ( Cynodon Plectostachyus ) as bulking agent on municipal biowaste compo. July.*
- 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>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Hernández-Gómez, A. M., Ríos, M., Portela, A., Sánchez Torres, V., Domínguez, I., & Komilis, D. (2021). A comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13031109>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2014). Influencia de la frecuencia del volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 91–100. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37029961008>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Soto Paz, J., Domínguez, I., Sanchez Torres, V., & Komilis, D. (2022). A Systematic Review on the Application of Bacterial Inoculants and Microbial Consortia During Green Waste Composting. *Waste and Biomass Valorization*, 13(8), 3423–3444. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01687-z>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Soto-Paz, J., Torres, V. S., Castellanos-Suarez, L. J., & Komilis, D. (2022). Effect of the addition of the *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp. bacterial strains on the co-composting of green and food waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107816>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L. F., Hoyos, L. V., Gonzales, S., Barrena, R., Komilis, D., & Sanchez, A. (2015). Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical,

chemical and biological indices. *Waste Management*, 44, 63–71.  
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.07.034>

Parra-Orobio, B. A., Soto-Paz, J., Hernández-Cruz, J. A., Gómez-Herreño, M. C., Domínguez-Rivera, I. C., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2023). Evaluation of Biochar as an Additive in the Co-Composting of Green Waste and Food Waste. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7437, 15(9), 7437. <https://doi.org/10.3390/SU15097437>

Picca, G., Plaza, C., Madejón, E., & Panettieri, M. (2023). Compositing of Coffee Silverskin with Carbon Rich Materials Leads to High Quality Soil Amendments. *Waste and Biomass Valorization*, 14(1), 297–307. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01879-7>

Qiu, X., Zhou, G., Zhang, J., & Wang, W. (2019). Microbial community responses to biochar addition when a green waste and manure mix are composted: A molecular ecological network analysis. *Bioresource Technology*, 273, 666–671. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.001>

Ramírez Velásquez, I. M., Vargas Ramírez, A. F., & Arroyave Cadavid, A. F. (2022). Relación entre el pH y las mediciones de conductividad eléctrica en un suelo cultivable ubicado en Medellín, Colombia. *Ingenierías USBMed*, 13. <http://portal.america.org/ameli/journal/536/5363548006/html/>

Real Academia Española. (n.d.). *Diccionario de la lengua española*. <https://www.rae.es/>

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. In *Waste Management* (Vol. 77, pp. 486–499). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>

- Rihani, M., Malamis, D., Bihaoui, B., Etahiri, S., Loizidou, M., & Assobhei, O. (2010). In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting. *Bioresource Technology*, 101(15), 5988–5995. <https://doi.org/10.1016/J.BIOR-TECH.2010.03.007>
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura Oficina Regional Para América Latina y El Caribe Santiago de Chile*. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- Saldarriaga Elorza, J. F. (2009). *Compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el proceso de compostaje de los residuos sólidos urbanos con separación en la fuente y su efecto en la salud humana*. Universidad de Medellín.
- Sánchez García, M., Albuquerque, J. A., Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., & Cayuela, M. L. (2015). Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions. *Bioresource Technology*, 192, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.003>
- Shackley, S., Sohi, S., Brownsort, P., Carter, S., Cook, J., Cunningham, C., Gaunt, J., Hammond, J., Ibarrola, R., Mašek, O., Sims, K., & Thornley, P. (2010). *An assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil. Impacts of biochar on soil*. The University of Manchester Research.
- Soobhany, N. (2018). Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste.

*Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1979–1988.

<https://doi.org/10.1016/J.JECE.2018.02.049>

SSPD, & DNP. (2023). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021*.

Superservicios, S. de S. P. D., & DNP, D. N. de P. (2016). *Disposición Final de Residuos Sólidos*.

Teresa Varnero, M. M., Rojas, C. A., & Orellana, R. R. (2007). Phytotoxicity indices of organic residues during composting. *Suelo Nutr. Veg*, 7(1), 28–37. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v7n1/art03.pdf>

Vandecasteele, B., Sinicco, T., D’Hose, T., Vanden Nest, T., & Mondini, C. (2016). Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake. *Journal of Environmental Management*, 168, 200–209. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2015.11.045>

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. (2016). Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc. *Bioresource Technology*, 218, 335–343. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.06.097>

Zhang, L., & Sun, X. (2017). Using cow dung and spent coffee grounds to enhance the two-stage co-composting of green waste. *Bioresource Technology*, 245, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.147>

- 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>
- Zhu, N., Gao, J., Liang, D., Zhu, Y., Li, B., & Jin, H. (2021). Thermal pretreatment enhances the degradation and humification of lignocellulose by stimulating thermophilic bacteria during dairy manure composting. *Bioresource Technology*, *319*, 124149. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.124149>
- Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., & De Bertoldi, M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *Biocycle*, *22*, 27–29.