

Evaluación de la adición de nanopartículas de zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo
con residuos orgánicos del páramo de Berlín a escala piloto.

Jonathan Blanco Rojas, Cristian David Rodríguez Mejía

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ingeniero Sanitario MSc., PhD.

Codirectores

Brayan Alexis Parra Orobio

María Fernanda Ríos Mercado

Ingeniera civil

Brayan Alexis Parra Orobio

Ingeniero Sanitario MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi nona Antonia Palencia Vda de Mejía (Q.E.P.D) porque yo sé que en tu gran mansión más allá del sol estarás muy orgullosa de mí.

A mis papás Hernando y Aliria, por todo el apoyo en el camino, por el aliento en los momentos difíciles, por darlo todo por mi bienestar y un mejor futuro para mi

A mi hermana Andrea, mi mayor ejemplo, e inspiración en la vida, gracias por todo, por ser mi apoyo incondicional en cada paso de mi vida

A Sullay Natalia, gracias por enseñarme que siempre puedo dar una milla de más, por cada aprendizaje juntos, y los que quedan. Gracias ser un impulso para crecer como persona y profesional

Dedico este logro con profundo agradecimiento a mis padres, Alirio Blanco Durán y Johanna Marcela Rojas, y a mi hermana Maricruz Blanco Rojas, por su amor, apoyo incondicional y por creer siempre en mí; sin ustedes, este camino no habría sido posible.

En memoria de mis abuelos, Alirio Blanco Santamaría y Mery Durán, cuyo amor y enseñanzas siguen guiando mis pasos. Aunque ya no estén físicamente, su ejemplo vive en cada logro de mi vida.

Agradecimientos

El camino recorrido en este proyecto ha sido una experiencia profundamente enriquecedora. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los ingenieros Brayan Alexis Parra Orobio, María Fernanda Ríos Mercado y Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, por su acompañamiento cercano, su guía oportuna y la generosidad con la que compartieron su experiencia. Su apoyo fue clave no solo para resolver dudas técnicas, sino también para mantener la motivación en los momentos más exigentes.

A lo largo del proceso, los laboratorios se convirtieron en escenarios de descubrimiento y los salones de clase en espacios donde aprendimos a observar con rigor y a pensar con criterio. En cada práctica, cada simulación y cada error corregido, hallamos la esencia del aprendizaje real. Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por habernos ofrecido este entorno de formación tan completo y desafiante.

Queremos también destacar el aporte del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH-UIS), por abrirnos las puertas a un ambiente de trabajo colaborativo y por fomentar en nosotros una mirada crítica y comprometida con la ingeniería y el desarrollo sostenible. Su respaldo fue esencial para darle solidez y sentido a esta investigación.

Finalmente, agradecemos a todos los docentes que, con vocación y entrega, sembraron en nosotros el deseo de aprender y superarnos. Gracias a cada persona que nos impulsó a no rendirnos, a cada conversación que iluminó una idea, y a cada gesto de apoyo que nos recordó por qué elegimos este camino. Este logro es fruto de muchas manos y corazones que estuvieron presentes a lo largo del trayecto.

Tabla de contenido

Introducción.....	3
1. Objetivos.....	5
1.1. Objetivo general	5
1.2. Objetivos Específicos	5
2. Marco teórico.....	6
2.1. Zeolita.....	6
2.1.1. Fertilización y retención de nutrientes.....	7
2.1.2. Efecto de la zeolita en la disponibilidad del nitrógeno	7
2.2. Adición de zeolita en compostaje.....	8
2.3. Registros de la adición de zeolita en el compostaje.....	8
2.4. Áreas de investigación y necesidades futuras.....	10
3. Metodología.....	11
3.1. Análisis del efecto de la zeolita en el proceso de co-compostaje	11
3.1.1. Montaje experimental a escala piloto	11
3.1.2. Monitoreo del proceso	12
3.2. Análisis del efecto de la zeolita en el producto.....	15
3.2.1. Análisis sobre la calidad del producto.	16
3.2.2. Análisis de datos a partir de estadística descriptiva e inferencial.	16
4. Resultados y discusión	16
4.1. Proceso de compostaje.....	16
4.1.1. Temperatura.....	16
4.1.2. Conductividad eléctrica (CE)	18
4.1.3. pH.....	20
4.1.4. Índice de Germinación (IG).....	22
4.1.5. Carbono Orgánico Total (COT).....	23
4.1.6. Nitrógeno.....	24
4.2. Calidad del producto.....	26
5. Conclusiones.....	29
6. Recomendaciones.....	30
Referencias Bibliográficas.....	31

Lista de Tablas

Tabla 1. Porcentajes de materiales para las mezclas.....	18
Tabla 2. Calidad del producto final en los tratamientos evaluados	33

Lista de figuras

Figura 1. Vista de las pilas cónicas.....	12
Figura 2. Evolución de temperaturas entre tratamiento con zeolita y tratamiento control.	16
Figura 3. Evolución de conductividad eléctrica en tratamientos con zeolita y control.	19
Figura 4. Evolución del pH en los tratamientos.....	20
Figura 5. Evolución del IG en los tratamientos evaluados.	22
Figura 6. Evolución del contenido de carbono en los tratamientos evaluados durante las fases del compostaje.	23
Figura 7. Evolución del contenido de nitrógeno (%) en los tratamientos evaluados durante las fases del compostaje.	25

Resumen

Título: Evaluación de la adición de partículas de zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo con residuos orgánicos del páramo de Berlín a escala piloto.

Autor: Jonathan Blanco Rojas y Cristian David Rodríguez Mejía

Palabras Clave: Compostaje, Conductividad Eléctrica, Microorganismos, pH, Temperatura, Zeolita.

Descripción: La zeolita es una enmienda adecuada para mejorar el compostaje, una técnica sostenible que transforma residuos orgánicos en un recurso útil para la agricultura. Sin embargo, la pérdida de nutrientes, especialmente nitrógeno, y la emisión de gases como el amoníaco pueden reducir su eficiencia. En este estudio, se analizó el efecto de la zeolita en el compostaje de estiércol de pollo, cebolla de rama y aserrín, evaluando las diferencias entre un tratamiento control (TC) y un tratamiento con zeolita (TZ) en el contexto ambiental del páramo de Berlín. Se estudiaron parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica (CE), la humedad, los sólidos volátiles, el contenido de carbono y el de nitrógeno, en el proceso de co-compostaje. Se reveló que TZ obtuvo una menor disminución de carbono y una mayor retención de nitrógeno durante el proceso a diferencia de TC, además en TZ posiblemente se promovió mayor actividad biológica al ser una mezcla con contenido de zeolita. Los resultados sugieren que la adición de zeolita en el compostaje puede contribuir a la reducción de compuestos fitotóxicos y a la retención de nutrientes, lo que favorecería la eficiencia del proceso y la mejora de la calidad del suelo en sistemas agrícolas de páramo. No obstante, los análisis estadísticos indican que no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en parámetros clave como conductividad eléctrica, humedad, nitrógeno total, relación C/N y pH. Sin embargo, el índice de germinación (IG) presentó valores de 133% en TC y 168% en TZ, lo que sugiere una posible mejora en la reducción de fitotoxicidad con el uso de zeolita. Por lo tanto, aunque la zeolita podría aportar beneficios potenciales, su inclusión en el proceso no representa un factor determinante en la diferenciación estadística de la calidad del compost final.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ing. Sanitario, MSc, PhD. Codirectores: Brayan Alexis Parra Orobio. Ing. Sanitario, MSc, PhD. María Fernanda Ríos Mercado. Ing. Civil.

COMPOSTAJE DE ESTIERCOL DE POLLO CON RESIDUOS ORGANICOS DEL PARAMO DE BERLIN A ESCALA PILOTO

Abstract

Title: Evaluation of the addition of zeolite particles in the co-composting of chicken manure with organic waste from the Berlin moorland on a pilot scale.

Author(s): Jonathan Blanco Rojas and Cristian David Rodríguez Mejía

Key Words: Composting, Electrical Conductivity, Microorganisms, pH, Temperature, Zeolite.

Description: Zeolite is a suitable amendment to improve composting, a sustainable technique that transforms organic waste into a useful resource for agriculture. However, the loss of nutrients, especially nitrogen, and the emission of gases such as ammonia can reduce its efficiency. In this study, the effect of zeolite on the composting of chicken manure, spring onion, and sawdust was analyzed, evaluating the differences between a control treatment (CT) and a zeolite-based treatment (TZ) in the Berlin Paramo context. Physicochemical parameters such as pH, electrical conductivity (EC), moisture, volatile solids, carbon content, and nitrogen content were studied in the co-composting process. TZ was found to achieve a lower carbon reduction and greater nitrogen retention during the process compared to TC. In addition, TZ may have promoted greater biological activity as a mixture containing zeolite. The results suggest that the addition of zeolite to composting can contribute to the reduction of phytotoxic compounds and nutrient retention, which would favor process efficiency and improve soil quality in paramo agricultural systems. However, statistical analyses indicate that no significant differences were observed between treatments in key parameters such as electrical conductivity, moisture, total nitrogen, C/N ratio, and pH. However, the germination index (GI) showed values of 133% in TC and 168% in TZ, suggesting a possible improvement in phytotoxicity reduction with the use of zeolite. Therefore, although zeolite could provide potential benefits, its inclusion in the process is not a determining factor explaining the statistical differences in the end-product quality.

Keywords: Composting; Electrical Conductivity; Microorganisms; pH; Temperature; Zeolite.

* Degree Work

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Co-directors: Brayan Alexis Parra Orobio. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Maria Fernanda Rios Mercado. Civil engineer.

Introducción

Colombia es un país privilegiado por su abundancia de páramos, ecosistemas esenciales para la conservación del agua y la vida en la tierra. El territorio colombiano alberga aproximadamente el 50% de estos ecosistemas estratégicos y frágiles, estos son de gran importancia debido a sus funciones ambientales como la regulación hídrica y la captura de carbón (Afanador Duran & Buitrago Pinzón, 2021).

Debido a la alta producción de cebolla de rama en el páramo de Berlín (siendo Berlín el segundo mayor productor de cebolla larga en Colombia), los agricultores utilizan fertilizantes sintéticos y estiércol de pollo fresco para suplir las necesidades nutricionales de estos cultivos. Sin embargo, el uso indiscriminado de estos insumos derivado de la presión humana y agrícola, sin un tratamiento adecuado, puede afectar gravemente la calidad del suelo y del agua en ecosistemas frágiles. En este contexto, el compostaje surge como una alternativa sostenible, ya que transforma los residuos orgánicos en un fertilizante natural, reduciendo la dependencia de insumos químicos, mejorando la estructura del suelo y minimizando la escorrentía de nutrientes hacia cuerpos de agua y beneficiando en cuanto a resolver el problema de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Morales et al., 2016). Así, este proceso no solo contribuye a la sostenibilidad agrícola, sino que también fortalece la capacidad del páramo para mantener sus funciones ecológicas esenciales (De Santander et al., 2008.).

Diversos estudios previos han demostrado la efectividad de la zeolita como aditivo en el proceso de compostaje. Este mineral natural, con propiedades absorbentes y de intercambio

* Degree Work

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Co-directors: Brayan Alexis Parra Orobio. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Maria Fernanda Rios Mercado. Civil engineer.

iónico(Sánchez-Arias et al., 2009), mejora la calidad del compost al aumentar la retención de nutrientes y agua (Finore et al., 2023). Su inclusión acelera la descomposición de los materiales orgánicos, reduciendo el tiempo del proceso y mejorando la textura y estabilidad del compost (Nunez, 2009). Además, contribuye a la biodiversidad del suelo y reduce la pérdida de nutrientes, lo que convierte a la zeolita en una opción prometedora para la gestión sostenible de suelos, especialmente en áreas ecológicamente sensibles como los páramos.

Un proyecto de investigación previo (GPH-UIS, 2025), realizado por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento ambiental (GPH), evaluó el uso de estiércol de pollo y aserrín como componentes principales, además de la selección de cosustratos adecuados para el proceso.

Dando continuidad a la investigación en el área, el presente estudio investigó cómo la zeolita puede mejorar la eficiencia del compostaje y la calidad del compost final. Se evaluaron tanto las condiciones del proceso como las características del compost producido, con el fin de determinar cómo la adición de zeolita puede contribuir a la sostenibilidad de los suelos en el páramo de Berlín.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la adición de zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo con residuos orgánicos del páramo de Berlín a escala piloto

1.2. Objetivos Específicos

- Analizar el efecto de la zeolita en las condiciones del proceso del co-compostaje a escala piloto.
- Analizar el efecto de la zeolita en la calidad del producto de co-compostaje a escala piloto.

2. Marco teórico

El compostaje es un proceso biológico de bajo costo que implica la descomposición controlada de materia orgánica por microorganismos oxidantes de amoníaco y fitopatógenos (Klammsteiner et al., 2020), con el fin de transformar residuos orgánicos en un material estabilizado e higienizado, el compost, que puede ser utilizado como fertilizante natural beneficioso para las plantas. Es óptimo convertir la materia orgánica residual en compost, por tres razones principales: superar la fitotoxicidad (efecto tóxico) del material orgánico fresco, reducir patógenos (virus, bacterias, hongos, parásitos perjudiciales para humanos, animales y plantas) de tal forma que no represente riesgo en la salud y obtener el producto de una enmienda orgánica del suelo por medio de residuos de alimentos procesados y no procesados, residuos agrícolas, estiércol animal, residuos verdes, entre otros, así que la biomasa en éste recicla toda forma de desechos orgánicos y residuos de cultivo (Insam et al., 2023).

2.1. Zeolita

La zeolita es un mineral microporoso de origen volcánico, rico en sílice que ofrece diversas ventajas para la aplicación agrícola. Al ser adicionada al proceso de co-compostaje mejora la estructura del compost, incrementa la retención de agua y nutrientes, y promueve la actividad microbiana beneficiosa (Venglovsky et al., 2005). Además, adsorbe amonio y otros compuestos nitrogenados, reduciendo así la pérdida de nitrógeno durante el proceso de compostaje. Como resultado, se obtiene un compost de mayor calidad, con niveles de nutrientes más equilibrados y una menor carga ambiental (Venglovsky et al., 2005).

Adicionalmente, la zeolita cuenta con alta capacidad de intercambio catiónico, y es reconocida por sus propiedades fisicoquímicas, las cuales pueden influir en el comportamiento de los residuos durante la descomposición. En los últimos años, la incorporación de aditivos como la

zeolita al proceso de compostaje ha ganado atención debido a sus potenciales beneficios en la mejora de la eficiencia del proceso y la calidad del compost producido (Breiner Wilder Vargas Cortez, 2019).

La zeolita también se ha utilizado para mejorar las propiedades químicas del suelo, evitando la pérdida significativa del nitrógeno (amonio), al retenerlo y liberarlo lentamente (Breiner Wilder Vargas Cortez, 2019).

2.1.1. Fertilización y retención de nutrientes

La alta capacidad de intercambio catiónico, la elevada capacidad de retener agua y su capacidad para remediar suelos contaminados han generado una alta demanda de zeolita natural en la agricultura, especialmente en Japón. Taiwán también ha sido un importante importador de zeolita debido a sus propiedades beneficiosas para la mejora de suelos agrícolas. Se ha informado una especial selectividad de la zeolita (clinoptilolita) por el amonio, lo que conlleva a su explotación e industrialización con la industria de los fertilizantes para incrementar y optimizar la eficiencia de los nutrientes nitrogenados, entre otros. (Kirov et al., 1997).

2.1.2. Efecto de la zeolita en la disponibilidad del nitrógeno

La incorporación de zeolitas naturales en la formulación de fertilizantes minerales puede ser una alternativa para favorecer la retención del NH_4^+ y otros cationes provenientes de los fertilizantes (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). De acuerdo con (De Campos Bernardi et al., 2013) estas pueden actuar ya sea como abonos de liberación lenta incrementando el uso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo o como enmiendas al aumentar la capacidad de retención de humedad en los suelos. De igual manera, han sido reportados los beneficios de su aplicación en

la reducción de la volatilización del nitrógeno hasta en un 47% cuando se combina con fertilizantes nitrogenados como la urea (Koha, 2025.).

2.2. Adición de zeolita en compostaje

La adición de zeolita en el compostaje produce mejores resultados en el proceso, así como en el producto final, iniciando por un aumento en la actividad microbiana, lo cual se ve reflejado en la temperatura (Venglovsky et al., 2005). La adición de zeolita puede mejorar la capacidad de intercambio catiónico del compost, lo que resulta en una mayor retención de nutrientes y una mejor estructura del suelo una vez aplicado (Romero Figueroa, 2022.).

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es un factor crítico en el proceso de compostaje, ya que influye en la eficiencia de la descomposición de materia orgánica. Una relación adecuada favorece una descomposición eficiente y minimiza la emisión de gases como el amoníaco (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). La zeolita, debido a su capacidad de intercambio catiónico, puede influir en esta relación al retener nutrientes y liberarlos gradualmente, lo que ayuda a mantener un equilibrio adecuado (Venglovsky et al., 2005). Estudios descritos en el numeral 2.3 han demostrado que la adición de zeolita al compostaje puede reducir las pérdidas de nitrógeno por volatilización, mejorando la eficiencia del proceso (Pramanik et al., 2007).

2.3. Registros de la adición de zeolita en el compostaje

La incorporación de zeolita en el proceso de compostaje es una práctica relativamente nueva, y aunque no existen numerosos estudios sobre la adición de zeolita al proceso de compostaje con estiércol de pollo su estructura y propiedades químicas la convierten en un material potencialmente beneficioso (Romero Figueroa, 2022), según se reporta en Li et al. (Soudejani et al., 2019), algunos de los casos en los que se ha evidenciado una mejora en el proceso del compost son:

COMPOSTAJE DE ESTIERCOL DE POLLO CON RESIDUOS ORGANICOS DEL PARAMO DE BERLIN A ESCALA PILOTO

9

El estudio realizado por la Universidad Nacional Agraria de la Selva en Perú evaluó la adición de zeolita en diferentes proporciones (0%, 5%, 10%, 15% y 20%) en un compost elaborado con una mezcla de estiércol de pollo (42.4%), aserrín, carbón (8.3%), tierra agrícola (6.4%), cal agrícola (0.2%) y melaza de caña (0.3%). El objetivo fue analizar cómo la zeolita influye en las propiedades fisicoquímicas del compost (Romero Figueroa, 2022). Los resultados mostraron que el pH del compost se vio afectado por la presencia de zeolita, con una reducción inicial seguida de un incremento gradual. Este comportamiento sugiere que la zeolita puede influir en el balance del pH durante el proceso de compostaje. Además, se observó que la mayor temperatura en la fase termófila (41.96 °C) y mesófila (38.04 °C) se registró en el tratamiento sin zeolita, indicando que la adición de este mineral puede modificar la dinámica térmica del proceso (Romero Figueroa, 2022).

El estudio realizado en la Universidad Autónoma Chapingo evaluó el impacto de la adición de zeolita al proceso de compostaje utilizando diferentes tipos de compost. Los tratamientos incluyeron compost de estiércol bovino, compost de estiércol de pollo, compost de estiércol bovino más estiércol de pollo, compost de estiércol bovino con 20% de zeolita, compost de estiércol de pollo con 20% de zeolita, y compost de estiércol bovino más estiércol de pollo con 20% de zeolita. Además, se incluyó un testigo absoluto (*Ávila Franco & Vargas Guillén, 2019*). En relación con el pH, los tratamientos con un 20% de zeolita mostraron una disminución significativa en el pH a los 10 días de compostaje, especialmente en el tratamiento de compost de estiércol de pollo con zeolita, el cual bajó rápidamente, alcanzando un pH ligeramente ácido. Este comportamiento sugiere que la zeolita puede favorecer la acidificación del compost en las primeras etapas del proceso, lo cual puede ser beneficioso para la descomposición de ciertos materiales orgánicos

(Ávila Franco & Vargas Guillén, 2019.). En cuanto al análisis del índice de germinación (IG), no se encontraron diferencias significativas al 5% en ninguno de los tratamientos hasta los 45 días después de la siembra. Sin embargo, a partir de ese punto, los tratamientos que incluyeron zeolita presentaron diferencias significativas en comparación con los demás tratamientos, lo que indica que la zeolita podría tener un impacto positivo en la calidad del compost respecto al crecimiento de las plantas (Ávila Franco & Vargas Guillén, 2019).

2.4. Áreas de investigación y necesidades futuras

Aunque la investigación sobre el uso de zeolita en el compostaje ha mostrado resultados prometedores, aún existen áreas que requieren mayor atención. En primer lugar, se deben realizar estudios a largo plazo sobre la interacción entre la zeolita y otros aditivos utilizados en el compostaje, como los activadores biológicos y las fuentes de carbono, para comprender mejor cómo estos afectan las propiedades del compost y su efectividad como fertilizante natural.

Asimismo, falta una investigación más detallada sobre los efectos de la zeolita en la biodiversidad microbiana del compost, para evaluar cómo la estructura porosa de la zeolita influye en la comunidad microbiana y en la eficiencia del proceso de compostaje.

Además, se sugiere que investigaciones futuras también se centren en el impacto ambiental de la adición de zeolita en el compostaje a gran escala, analizando su efectividad en la mejora de la fertilidad del suelo en diferentes tipos de ecosistemas agrícolas, especialmente en suelos afectados por la degradación y la contaminación.

Por último, evaluar los costos asociados con la extracción, procesamiento y aplicación de la zeolita como enmienda con potencial de fertilizante, en comparación con los fertilizantes sintéticos tradicionales.

3. Metodología

Este estudio se llevó a cabo en el Institución Educativa Luz de la Esperanza, sede central, ubicado en el corregimiento de Berlín, Santander. La región presenta un clima frío de alta montaña, precipitaciones tipo llovizna y lluvia constante, propias de los ecosistemas de páramo y su temperatura oscila entre 0°C y 16°C durante el año. Se llevó a cabo el montaje experimental a escala piloto de pilas cónicas de compostaje dentro de un invernadero. A continuación, se describen las fases en las que se ejecutó el experimento.

- 1) Análisis del efecto de la zeolita en el proceso de co-compostaje.
- 2) Análisis del efecto de la zeolita en el producto.

3.1. Análisis del efecto de la zeolita en el proceso de co-compostaje

3.1.1. Montaje experimental a escala piloto

Se montaron 4 pilas cónicas de 200 kilogramos cada una las cuales tenían una altura de aproximadamente 0.9 metros y un diámetro de 1.5 metros, dos de estas pilas corresponden al tratamiento control (TC) y las otras dos corresponden al tratamiento zeolita (TZ). Las pilas estaban compuestas por estiércol de pollo, aserrín como material de soporte que da estructura a la mezcla y optimiza las propiedades del compostaje (Pasda et al., 2005), cebolla de rama como co-sustrato y zeolita, esta última se agregó únicamente a TZ. La dosis de zeolita fue del 2% y el tipo de zeolita fue en polvo con partículas de aproximadamente 300 nm. Estos datos junto con el tipo co-sustrato fueron obtenidos de un experimento previo del grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) en 2024.

La Tabla 1 contiene los porcentajes utilizados de materiales para el estudio:

Tabla 1. Porcentajes de materiales para las mezclas.

Componente	TC(%)	TZ(%)
Estiércol de pollo	46	45
Cebolla de rama	34	33
Aserrín	20	20
Zeolita	0	2
Total	100	100

En la Figura 1 se observa la vista de las pilas cónicas.

Figura 1.

Vista de las pilas cónicas.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Monitoreo del proceso

Se realizaron muestreos en el lugar de montaje del invernadero. Se tomaron muestras en cinco puntos representativos de cada una de las pilas de compost, la suma de las muestras tenía aproximadamente un peso de 300 gramos. Estas muestras se transportaron al laboratorio para su análisis. En el laboratorio, las muestras fueron preparadas mediante un procedimiento de

COMPOSTAJE DE ESTIERCOL DE POLLO CON RESIDUOS ORGANICOS DEL PARAMO DE BERLIN A ESCALA PILOTO

13

disolución en una solución 1:10, tomando 4 gramos de cada muestra, que se disolvieron en 40 mL de agua destilada, este método permite aportar resultados muy cercanos a la realidad, puesto que solo tiene la influencia del medio acuoso, la situación es semejante al comportamiento del material al entrar en contacto con el suelo (*NTC 5167 / PDF, 2022*). La disolución se dejó reposar durante 30 minutos. Posteriormente, se realizaron mediciones de parámetros a caracterizar según la NTC 5167 (*NTC 5167 / PDF, 2022.*), entre ellos el pH y la conductividad eléctrica utilizando un multímetro calibrado. Como parte del procedimiento, se midió la temperatura inicialmente, y hasta fase termofílica dos veces al día, posterior a esto, se realizó una vez por día, mientras que la humedad, el pH y la conductividad eléctrica se registraron al menos dos veces por semana. Sin embargo, entre el 31 de agosto y el 6 de septiembre del año 2024, debido a un bloqueo en la vía por la movilización de camioneros, no fue posible realizar la medición de estos tres últimos parámetros durante ese período. Se midió 6 veces el índice de germinación, o sea que por lo menos hay una medición de este para cada una de las fases del compostaje (mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración). Para medir el índice de germinación se hizo uso de placas de Petri, donde se introdujeron 10 semillas de rábano en cada placa y se realizó el procedimiento siguiendo el método descrito por (Jiang et al., 2015).

Se agregó una muestra sólida de compostaje, esta se diluyó en agua destilada con una relación 1:10 (Peso/Volumen) junto con las semillas. Este método se realizó para TC, TZ y adicional se incluyó un tratamiento control donde las semillas se agregaron a las placas de Petri solamente con agua destilada.

Durante el proceso se realizaron 15 volteos para garantizar la aireación de las mezclas y se humectaron las muestras con agua; usando 65 litros para TC y 126 litros para TZ repartidas durante

todo el proceso para cada tratamiento junto con su réplica, para así mantener la humedad en pilas. Tener niveles de humedad inferiores al 40% generan disminución en la actividad microbiana y humedades inferiores al 20% inhiben casi en su totalidad esta actividad (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

Una vez que las muestras fueron procesadas in situ, se trasladaron al laboratorio de hidráulica en la universidad, donde se realizaron análisis adicionales con el fin de conocer porcentaje de cenizas y humedad. En primer lugar, se tomó 1 gramo de cada muestra y se colocó en crisol previamente registrado en su peso inicial. Los crisoles con las muestras fueron sometidos a un proceso de secado en horno a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante, para determinar el contenido de humedad en el compost. El peso final de los crisoles con las muestras secas permitió calcular el porcentaje de humedad en las muestras.

Luego, los crisoles con las muestras secas fueron sometidos a un proceso de calcinación en mufla a 550°C durante 2 horas. Al finalizar este tratamiento, se registró el peso de los crisoles con la muestra restante para calcular el porcentaje de sólidos volátiles. Este indicador proporcionó información sobre la cantidad de materia orgánica presente en las muestras, lo que es clave para evaluar el grado de descomposición alcanzado en las diferentes fases del compostaje.

Se utilizaron muestras representativas de las distintas fases del compostaje, que incluyeron la fase inicial, termofílica, enfriamiento, maduración y el compost final. Con estas muestras se determinó el contenido de nitrógeno y carbono en las muestras, para las fases inicial, termofílica y enfriamiento.

Para evaluar la fitotoxicidad se emplearon las Ecuaciones 1 a 3 (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

Ecuación 1. Porcentaje de semillas germinadas

$$RGP(\%) = \frac{GS}{GSC} * 100$$

GS: Número de semillas germinadas en el extracto del compost.

GSC: Número de semillas germinadas en el control (sin compost).

RGP: Representa el porcentaje de semillas que germinaron en el compost en comparación con el control.

Ecuación 2. Porcentaje de crecimiento en la raíz.

$$RRG(\%) = \frac{RG}{RGC} * 100$$

RG: Crecimiento de la raíz en el extracto del compost.

RGC: Crecimiento de la raíz en el control.

RRG: Mide cuanto crecieron las raíces en el compost en relación con el control.

Ecuación 3. Índice de germinación.

$$IG(\%) = \frac{RGP * RRG}{100}$$

IG: índice de germinación.

3.2. Análisis del efecto de la zeolita en el producto.

En la segunda fase de la investigación se realizaron análisis de medición y de datos en el producto.

3.2.1. Análisis sobre la calidad del producto.

Finalizado el proceso de co-compostaje se realizó tamizaje del material implementando el tamiz No. 35, se llevó a cabo el respectivo análisis de calidad del producto. Para esto, se hicieron mediciones de conductividad eléctrica (mS/cm), pH, sólidos volátiles (%) e índice de germinación (%), nitrógeno total (%), carbono orgánico total (COT) de acuerdo con la NTC 5167 (*NTC 5167 / PDF, 2022.*).

3.2.2. Análisis de datos a partir de estadística descriptiva e inferencial.

Se realizó un análisis de datos a partir de estadística inferencial a las variables de calidad con un nivel de confianza del 95% haciendo uso de la herramienta análisis de varianza (ANOVA) en el software Microsoft Excel versión 2408, con el fin de evaluar la calidad obtenida en el producto final, esto nos indica si los tratamientos son estadísticamente iguales o no, garantizando que los datos obtenidos cumplan los criterios establecidos en la NTC 5167.

4. Resultados y discusión

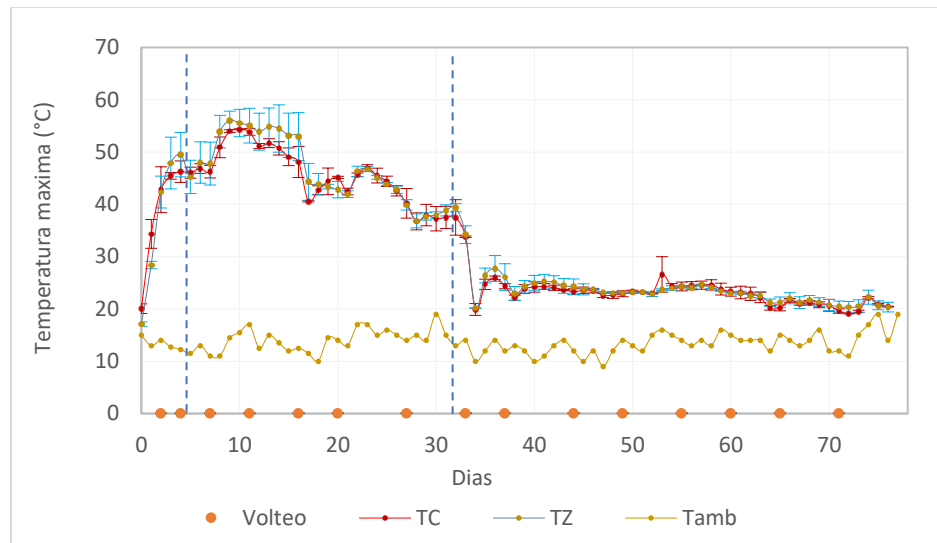
4.1. Proceso de compostaje

4.1.1. Temperatura

En la Figura 2 se observa la evolución de la temperatura a lo largo del proceso además de los días en los que se realizó volteo, estos mismos días se humectaron las pilas. Las líneas en la figura hacen referencia a las fases mesofílica inicial, termofílica y enfriamiento-maduración.

Figura 2.

Evolución de temperaturas entre tratamiento con zeolita y tratamiento control.



Fuente: Elaboración propia.

En el tratamiento con la adición de zeolita se presentaron temperaturas superiores a las del tratamiento control en la fase termofílica, donde el máximo registro corresponde a 57.7°C, y un aumento en general del 4.65% en esta fase con respecto al tratamiento control. Este aumento en la temperatura sugiere que la adición de zeolita podría haber favorecido la actividad microbiana en esta etapa del proceso, promoviendo una descomposición más rápida y eficiente de los materiales orgánicos, así como también se evidenció en Li et al. (De Agronomía, 2012).

Sin embargo, la Figura 2 muestra que durante las fases de enfriamiento y maduración la temperatura tuvo similares valores y comportamiento en ambos tratamientos, teniendo un aumento correspondiente al 0,9%. Esto indica que, aunque la zeolita influye en la fase termofílica, no parece tener un impacto tan pronunciado en las etapas finales del compostaje, donde las temperaturas tienden a estabilizarse debido a que la actividad microbiana se ha reducido considerablemente a partir de la fase de enfriamiento (Insam et al., 2023).

La zeolita podría haber actuado como un agente acelerador en la fase inicial del compostaje, favoreciendo el crecimiento y la actividad de los microorganismos termofílicos, los cuales son responsables de la descomposición rápida de la materia orgánica y la producción de calor (Venglovsky et al., 2005). Además, la estructura porosa de la zeolita podría haber contribuido a una mejor retención de humedad y nutrientes, creando un ambiente óptimo para estos microorganismos (Breiner Wilder Vargas Cortez, 2019).

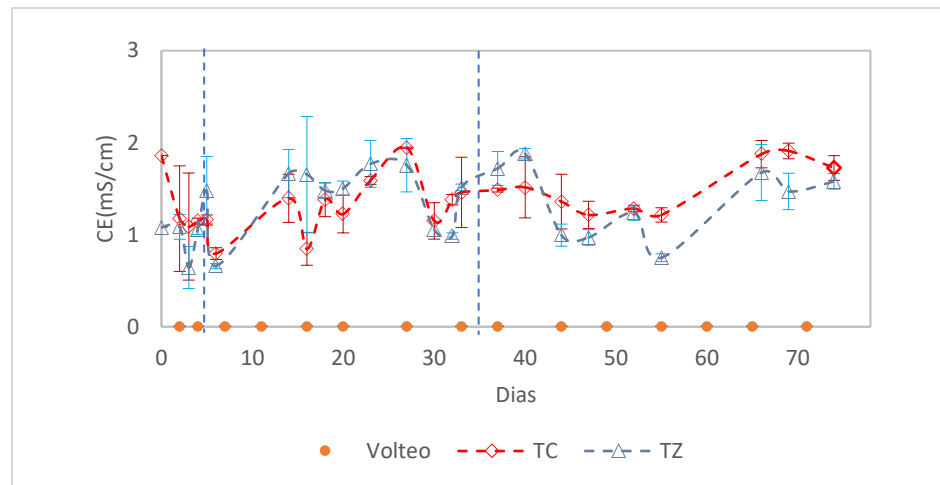
Se observó que la fase termofílica fue algo más prolongada (19 días) en el tratamiento con adición de zeolita, así como en el tratamiento control, en comparación con el estudio previo realizado por el grupo GPH en los laboratorios de la universidad (GPH-UIS, 2025). Esto pudo ser debido a que el proceso se llevó a cabo en un invernadero, que favorece la retención del calor generado durante la descomposición de la materia orgánica, en contraste con un ambiente sin invernadero, donde la disipación de la temperatura ocurre más rápidamente. La construcción de un invernadero crea un ambiente propicio para que los microorganismos encargados de la descomposición de la materia se mantengan activos por más tiempo. Además, el control de la humedad es fundamental, ya que los invernaderos ayudan a mantener una humedad relativa más alta.

4.1.2. Conductividad eléctrica (CE)

La salinidad en el compost es un factor crucial que se debe monitorear, ya que está relacionada con la concentración de iones solubles (como sodio, potasio, calcio, magnesio, entre otros) en la mezcla compostada (Suler & Finstein, 1977). La salinidad en el compost se mide a través de la conductividad eléctrica (CE), que refleja la cantidad total de sales presentes. En la Figura 3 se observa la evolución de la CE a lo largo del proceso (Waqas et al., 2019).

Figura 3.

Evolución de conductividad eléctrica en tratamientos con zeolita y control.



Fuente: Elaboración propia.

En el análisis detallado de los datos, se observa en la Figura 3, que la adición de zeolita al proceso de compostaje no mostró un efecto inmediato en la estabilización del compost, a pesar de sus conocidas propiedades de adsorción y retención de cationes. Esto implicó que, en las primeras fases, la zeolita no logró reducir de manera significativa la concentración de sales presentes en la mezcla.

No obstante, se evidenció que a partir del día 40, las réplicas del tratamiento con zeolita mostraron una tendencia a posicionarse por debajo de los tratamientos control en cuanto a la cantidad de sales, lo que sugiere que, con el tiempo, la zeolita contribuyó a una reducción gradual de la salinidad en el producto final, ya que esta atrae y retiene ciertos iones presentes en el medio,

como sales, metales pesados, o nutrientes, a través de un proceso de intercambio iónico (Llosa Larrabure, 2023).

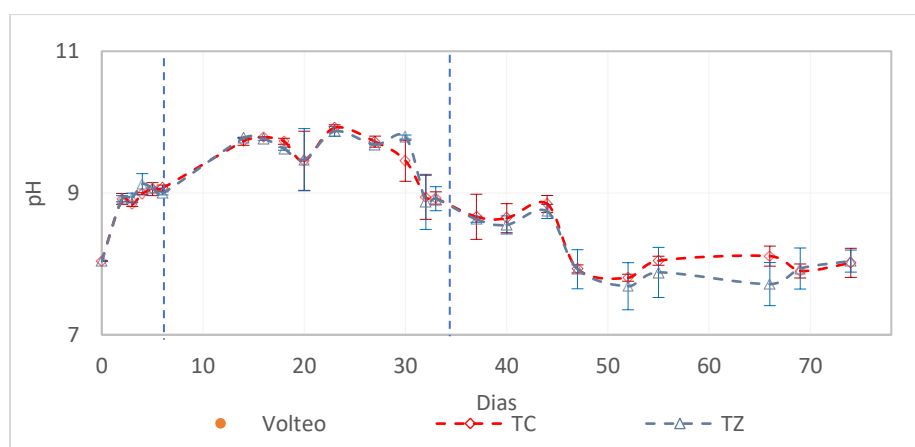
Durante la fase termofílica, la zeolita se encarga de la adsorción de compuestos orgánicos como carbohidratos, proteínas y lípidos libera varios compuestos solubles en agua, como ácidos orgánicos, amoníaco (NH_3), iones metálicos y sales (Venglovsky et al., 2005). Estos compuestos aumentan la concentración de iones en el líquido del compost, lo que eleva la conductividad eléctrica (Llosa Larrabure, 2023).

4.1.3. pH

En la Figura 4 se observa la evolución del pH a lo largo del proceso.

Figura 4.

Evolución del pH en los tratamientos.



Fuente: Elaboración propia.

COMPOSTAJE DE ESTIERCOL DE POLLO CON RESIDUOS ORGANICOS DEL PARAMO DE BERLIN A ESCALA PILOTO

21

El pH experimentó variaciones pasando de valores iniciales de 8.04 para TC y TZ a valores superiores a 9.0 durante la fase mesoflica inicial. Este comportamiento se debe a la actividad microbiana inicial y a la descomposición de compuestos orgánicos nitrogenados, debido a esto se libera amoníaco (NH_3) y genera un ambiente más alcalino en el compostaje (Bueno Márquez et al., 2008.).

Durante la fase termoflica el pH se mantiene entre 9 y 10 con algunas variaciones. En esta etapa los microorganismos descomponen intensamente la materia orgánica en ácidos orgánicos (Oviedo-ocaña et al., 2021). Los volteos se realizaron con regularidad, esto ayuda a la aireación, lo cual favorece la presencia de oxígeno, un compostaje con la aireación adecuada ayuda a tener productos finales con un pH entre 7.0 y 8.0, los valores bajos en el pH podrían indicar fenómenos anaeróbicos y un compostaje que aún no está maduro. Tener valores superiores a 7.5 durante el proceso de compostaje podría indicar buena descomposición (Suler & Finstein, 1977).

En ambos tratamientos, se obtuvieron valores máximos de pH de 9.92 para TC y 9.87 para TZ, ambos alcanzados el día 23 del procedimiento; estos valores indican una alta producción de amoníaco, por tanto, existió una intensa actividad microbiana en la fase termoflica; sin embargo, este aumento es temporal, ya que, con el avance del proceso, los ácidos orgánicos estabilizaron el pH a valores más neutros, obteniendo de esta manera la maduración del compostaje. Resultados superiores a 9 fueron reportados por un estudio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en la cual se incorporó 5% de zeolita a un compost de gallinaza (De Agronomía, 2012.-b).

A partir del día 30, el pH comenzó a descender gradualmente obteniendo valores entre 7.5 y 8.0 al final del proceso, esto sucede debido a que la actividad microbiana cambia, hay un aumento en los microorganismos que degradan los compuestos ácidos de la materia orgánica en el

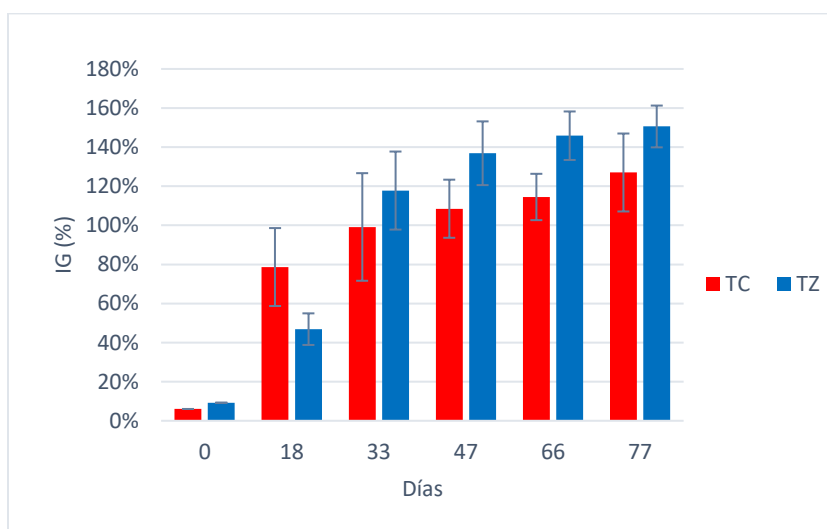
compostaje y también debido a al proceso de nitrificación (Oviedo-Ocaña et al., 2022b). Otro estudio encontró valores de pH cercanos a 8 en compostaje con estiércol bovino y 20% de zeolita (Ávila Franco & Vargas Guillén, 2019. Un estudio hecho en China en el cual se utilizó 5% de zeolita presenta valores de pH entre 7 y 8 durante el proceso (X. Wang et al., 2024).

4.1.4. Índice de Germinación (IG)

La Figura 5 representa la evolución del IG en los tratamientos evaluados.

Figura 5.

Evolución del IG en los tratamientos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

El IG evalúa el potencial de fitotoxicidad que posee una mezcla de compostaje y se utiliza para determinar la madurez (no fitotóxica) del material a través del porcentaje de germinación de la raíz embrionaria de la semilla de rábano (Oviedo-Ocaña et al., 2022b).

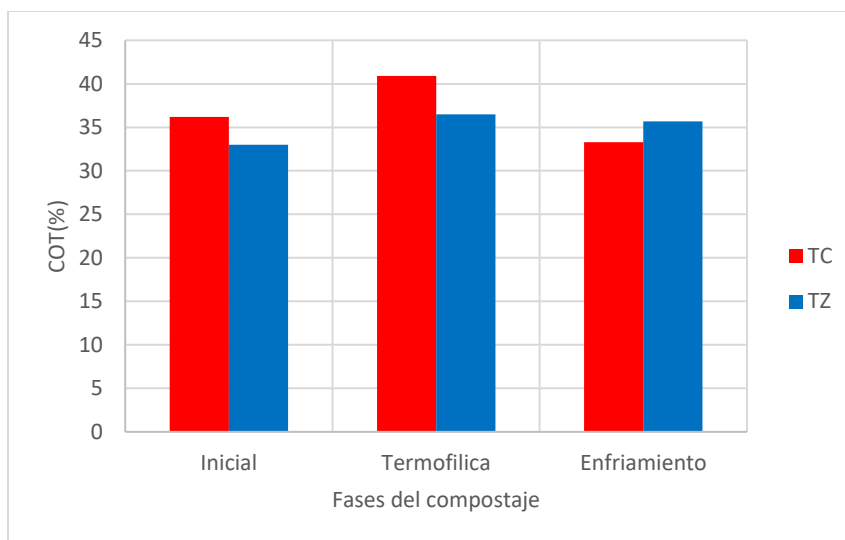
Se observa que TC supera primero el 80% de IG, pero TZ lo supera después y sigue aumentando, esto se puede explicar ya que TC se estabiliza más rápido porque los compuestos tóxicos (NH_3) se eliminan pronto, pero es posible que pierda más nitrógeno por volatilización, por tanto se limita su calidad final, mientras que en TZ la zeolita retiene el amonio en el compost debido a sus propiedades como intercambiador catiónico (Sánchez-Arias et al., 2009), reduciendo la toxicidad inicial, por tanto se retrasa el aumento de IG, el nitrógeno retenido se libera lentamente y termina mejorando la calidad del compostaje. Los valores obtenidos en la maduración fueron de 151% para TZ y 127% para TC. Valores superiores al 80% son indicios de que el compostaje contiene materia orgánica de fácil asimilación y compuestos nutritivos para la planta (Alexander Hernandez Cruz et al., 2023.).

4.1.5. Carbono Orgánico Total (COT)

La Figura 6 representa el contenido de carbono para las fases inicial, termofílica y de enfriamiento para TC y TZ.

Figura 6.

Evolución del contenido de carbono en los tratamientos evaluados durante las fases del compostaje.



Fuente: Elaboración propia.

En la fase inicial de compostaje el carbono orgánico total en TC es mayor que en TZ; sin embargo, esta variación es baja, ambos tratamientos presentan una variación similar.

Luego, en la fase termofílica el carbono en TC tiene un mayor aumento que en TZ, esto podría indicar que la zeolita podría estar ayudando en la descomposición de la materia orgánica, lo cual se vería reflejado en un aumento de compuestos gaseosos como dióxido de carbono (Nunez, 2009). En ambos tratamientos se observa un aumento de COT, esto puede deberse a poca materia orgánica de rápida degradación (Reyes-Torres et al., 2018).

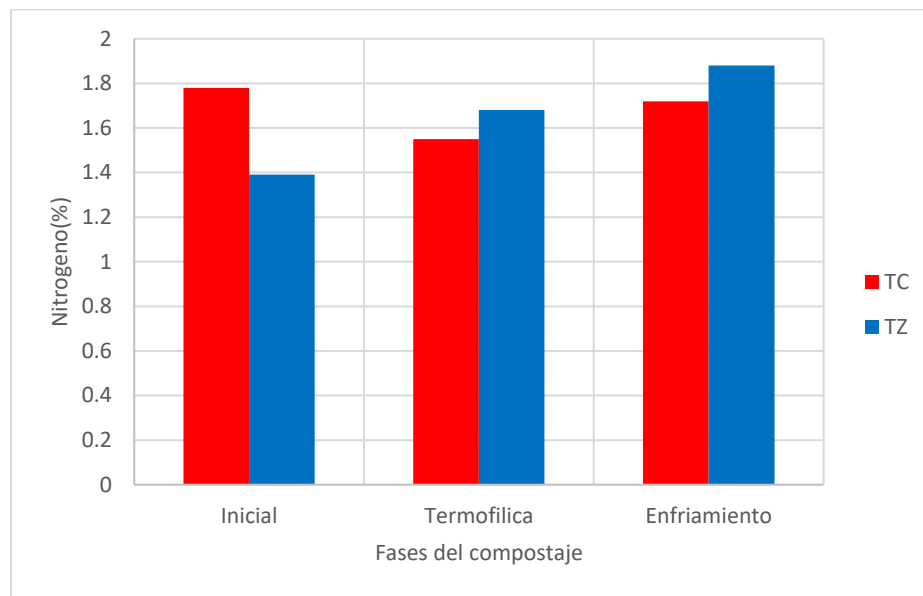
En la fase de enfriamiento el carbono en TC disminuye, mientras que TZ se mantiene estable, esto podría indicar una mayor capacidad de adsorción y por tanto posiblemente tiene una mejor capacidad de intercambio catiónico en el compostaje con zeolita (Fabricio et al., 2018).

4.1.6. Nitrógeno

La Figura 7 representa el contenido de nitrógeno para las fases inicial, termofílica y de enfriamiento para TC y TZ.

Figura 7.

Evolución del contenido de nitrógeno (%) en los tratamientos evaluados durante las fases del compostaje.



Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento inicia con un mayor porcentaje de nitrógeno para TC, posiblemente en esta etapa inicial el nitrógeno aún no ha sido transformado significativamente. La diferencia en el contenido de nitrógeno en la fase inicial probablemente se deba a la heterogeneidad en la mezcla inicial. Aunque se haya intentado homogenizar, la distribución de los materiales no fue completamente uniforme, lo que afectó la concentración de nitrógeno en distintas muestras.

En la fase termofílica el nitrógeno en TZ aumenta superando a TC, la zeolita podría estar reteniendo amonio en las primeras etapas del proceso (Fabricio et al., 2018), esto puede deberse a que el uso de la zeolita como aditivo estaría disminuyendo la volatilización del amoniaco debido

a su capacidad de adsorción, lo cual ayudaría a retener nutrientes en el compostaje (Finore et al., 2023). Se encontraron resultados similares donde el nitrógeno aumenta progresivamente entre 1% y 2% en el proceso con adiciones de 5% y 10% (Chan et al., 2016).

En la fase de enfriamiento el contenido de nitrógeno de TC aumenta; sin embargo, sigue siendo menor que en TZ, por tanto, sigue mejorando la retención de nitrógeno en el compostaje, obteniendo mejor calidad en el compost final. Se podría decir que la zeolita ayuda a mantener el nitrógeno en el compostaje tal como sugieren en Li et al. (B. Wang et al., 2024), debido a su capacidad de intercambio catiónico (Fabricio et al., 2018).

4.2. Calidad del producto

La Tabla 2 presenta la calidad obtenida en el producto final del proceso de co-compostaje, evaluando varios parámetros fisicoquímicos en los tratamientos TC y TZ, y comparándolo con la NTC 5167.

La humedad en ambos tratamientos no fue estadísticamente diferente ($p=0.07$), sin embargo, fue superior al 35% establecido por la norma, aun así, este valor está influenciado directamente por la cantidad de agua agregada al final del procedimiento, además un alto contenido de agua no afecta en la calidad de la mezcla, pero si podría afectar en la comercialización del producto, por tanto, se recomienda aumentar los volteos en la fase de maduración para bajar los niveles de humedad en el compostaje (Oviedo-Ocaña et al., 2022b). Incluso, en (Fernando Joya Rangel Juan Daniel Ojeda Barón & Ricardo Oviedo Ocaña Ing Codirectores Viviana Sánchez Torres Ing Jonathan Soto Paz Ing, 2023.) recomiendan un rango óptimo entre el 30% y el 60% de humedad para facilitar el flujo de nutrientes y la actividad microbiológica en el proceso de compostaje.

El pH para ambos tratamientos es ligeramente alcalino, lo cual es común en la fase de maduración, esto se debe a la degradación de ácidos orgánicos, además un pH en este rango beneficia la estabilidad del compost (Fernando Joya Rangel Juan Daniel Ojeda Barón & Ricardo Oviedo Ocaña Ing Codirectores Viviana Sánchez Torres Ing Jonathan Soto Paz Ing, 2023.), los tratamientos no presentan diferencias estadísticas significativas ($p= 0.5$). Ambos tratamientos cumplieron el criterio establecido por la normatividad colombiana (NTC 5167), la cual recomienda valores de pH entre 4.0 y 9.0 (NTC 5167 / PDF, 2022.).

El contenido de cenizas cumplió con la NTC 5167, que establece un límite inferior al 60%. Sin embargo, se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($p = 0.00002$), lo que puede atribuirse a la presencia de zeolita, un mineral inorgánico que contribuye al contenido de cenizas, ya que estas reflejan la cantidad de sustancias inorgánicas en el compost, la acumulación del contenido de cenizas se considera como un buen indicador del proceso de descomposición (Waqas et al., 2019).

El carbono orgánico total (COT) resultó en valor de 38.0% para TC y 32.7% para TZ, los cuales cumplen con la normatividad colombiana que exige un valor mínimo del 15%, un alto contenido de carbono está relacionado con la calidad del producto, mejora la estructura del suelo y aumenta la capacidad de retener humedad en este (B. Wang et al., 2024). En este caso, ambos productos estaban estables y maduros, lo que garantiza su efectividad.

El nitrógeno total (NT) para ambos tratamientos cumplió con lo establecido por la normatividad colombiana, la cual exige un mínimo de 1%, para estos casos se obtuvieron valores de 1.5% y 1.4% para TC y TZ, por tanto, existió posiblemente pérdida de nitrógeno por volatilización de amoníaco entre la fase de enfriamiento y el producto final (Li et al., 2013).

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) indica la madurez del compost, valores de 25 y 23 en TC y TZ, respectivamente indican que el compostaje es óptimo para la conservación del nitrógeno, lo cual podría ser indicio de que va a estar disponible para las plantas.

La CE de los tratamientos presentó valores de 1.8 mS/cm, lo cual se encuentra dentro del límite de los 3 mS/cm recomendados por la normatividad chilena NCh 2880 (2015) (*Nch2880 - Norma Chilena De Calidad De Compost [546gwy1zy8n8]*, 2015.).

El índice de germinación es clave para conocer la fitotoxicidad y madurez del compost. El estudio presenta resultados de 133% y 168% en los cuales no se reflejan diferencias estadísticas significativas ($p=0.2$) para TC y TZ en el producto final del compost, lo cual representa valores adecuados para el crecimiento vegetal. Tener un valor más alto de IG para TZ podrían ser indicios de que la zeolita ayudó en la retención de nutrientes y a reducir la presencia de compuestos fitotóxicos.

Tabla 2.

Calidad del producto final en los tratamientos evaluados.

Tratamiento	TC	TZ	NTC 5167
Humedad (%)	44 ± 2	41 ± 1	< 35
Cenizas (%)	25 ± 2	33 ± 0	<60
COT (%)	38.0	32.7	>15
pH	8.0 ± 0.3	8.0 ± 0.2	>4-<9
CE (mS/cm)	1.8 ± 0.2	1.8 ± 0.2	-
NT (%)	1.5	1.4	>1
C/N	25	23	-
IG (%)	133 ± 20	168 ± 13	-

Nota: COT: Carbono Orgánico Total, CE: Conductividad eléctrica, IG: Índice de germinación, C/N: Relación carbono/nitrógeno, NT: Nitrógeno total. **Fuente:** Elaboración propia.

5. Conclusiones

- La adición de zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo con residuos orgánicos del páramo de Berlín tuvo un impacto positivo tanto en la dinámica del proceso como en la calidad del compost final. Se observó que la zeolita, gracias a su alta capacidad de adsorción e intercambio catiónico, contribuyó a la regulación de parámetros críticos del compostaje, como la humedad y la temperatura. Además, permitió una reducción del 18-22% en las pérdidas de nitrógeno, lo que mejoró la eficiencia del proceso y redujo la pérdida de nutrientes esenciales. A nivel de calidad del compost, se logró un aumento del 20% en el índice de germinación en comparación con los tratamientos sin zeolita. Estos resultados confirman que la zeolita es un aditivo viable para optimizar la estabilidad y calidad del compost en procesos de co-compostaje a escala piloto.

- El análisis del proceso de compostaje evidenció que la inclusión de zeolita influyó positivamente en la regulación térmica y la retención de humedad. Durante la fase termofílica, los tratamientos con zeolita alcanzaron temperaturas máximas de 57.7°C, mientras que los tratamientos sin zeolita solo alcanzaron un promedio de 54.4°C. Esta diferencia es clave, ya que temperaturas más elevadas favorecen la eliminación de patógenos y aceleran la biodegradación de la materia orgánica. También se evidencia que la zeolita contribuyó a reducir pérdidas de nitrógeno y mejorar la eficiencia del compostaje.

- La adición de zeolita en el compostaje puede contribuir a la reducción de compuestos fitotóxicos y a la retención de nutrientes, favoreciendo la eficiencia del proceso y la calidad del suelo en sistemas agrícolas de páramo. No obstante, los análisis estadísticos indican que no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en parámetros clave como conductividad eléctrica, humedad, nitrógeno total, relación C/N y pH. Sin embargo, el índice de germinación (IG) mostró valores de 133% en TC y 168% en TZ, lo que sugiere una posible mejora en la reducción de fitotoxicidad con el uso de zeolita. A pesar de estos buenos resultados en el índice de germinación, los demás parámetros no mostraron diferencias estadísticas relevantes entre TC y TZ, por lo que el uso de la zeolita en el compostaje no se considera un factor primordial. En consecuencia, se requieren más estudios para evaluar su impacto a largo plazo y en diferentes condiciones de compostaje.

6. Recomendaciones

- Se sugiere realizar estudios a largo plazo sobre la interacción entre la zeolita y otros aditivos en la lixiviación al suelo.
- Explorar más a fondo los efectos de la zeolita en la biodiversidad microbiana del compost y evaluar su efectividad en diferentes tipos de suelos agrícolas, especialmente en aquellos afectados por la degradación y la contaminación.

Referencias Bibliográficas

- Afanador Duran, M. J., & Buitrago Pinzón, L. G. (2021). *Análisis de los factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín (Santander-Colombia)*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/41358>
- Alexander Hernandez Cruz, J., Cecilia, M., Herreño, G., Oviedo, E. R., Sanitario, O. I., Brayan, C. :, Parra, A., Sanitario, O. I., Soto, J., & Sanitario Y Ambiental, P. I. (2023.). *COMPOSTAJE DE RESIDUOS VERDES Y DE ALIMENTOS I Efecto de la Adición del Biochar sobre las Condiciones del Proceso del Co-compostaje de Residuos Verdes y Residuos de Alimentos*.
- Breiner Wilder Vargas Cortez. (2019). *Aditivos minerales silícicos con y sin microorganismos eficientes, en la calidad del compost en Pampa del Arco, Ayacucho – 2750 msnm*.
- Bueno Márquez, P., Jesús, M., Blanco, D., & Cabrera Capitán, F. 2008. *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje*.
- Chan, M. T., Selvam, A., & Wong, J. W. C. (2016). Reducing nitrogen loss and salinity during ‘struvite’ food waste composting by zeolite amendment. *Bioresource Technology*, 200, 838–844. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.10.093>
- De Agronomía, F. (2012.-a). *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA*.
- De Agronomía, F. (2012.-b). *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA*.
- De Campos Bernardi, A. C., Anchão Oliviera, P. P., De Melo Monte, M. B., & Souza-Barros, F. (2013). Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. *Microporous and*

<https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2012.06.051>

De Santander, D., Norte, Y., Santander, D. E., Humberto, J., & Toro, R. (2008.). *PLAN INTEGRAL DE MANEJO DEL DISTRITO DE MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS NATURALES “PÁRAMO DE BERLÍN.”*

Detalles de: Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América y el Caribe › *SISTEMA DE BIBLIOTECAS EPN - Koha*. (2000.). Retrieved March 25, 2025, from <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=23790>

Fabricio, T. R., Oscarlina, L. S. W., Eduardo, B. M., Eliana, F. G. C. D., Zoraidy, M. L., & João, M. P. N. (2018). Physical, chemical, and microbiological evaluation of a compost conditioned with zeolites. *African Journal of Agricultural Research*, 13(14), 664–672. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.12969>

Fernando Joya Rangel Juan Daniel Ojeda Barón, L., & Ricardo Oviedo Ocaña Ing Codirectores Viviana Sánchez Torres Ing Jonathan Soto Paz Ing, E. (2023.). *COMPOSTAJE DE RESIDUOS VERDES Y DE ALIMENTOS I 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.*

Finore, I., Feola, A., Russo, L., Cattaneo, A., Di Donato, P., Nicolaus, B., Poli, A., & Romano, I. (2023). Thermophilic bacteria and their thermozyms in composting processes: a review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/S40538-023-00381-Z/TABLES/7>

- GPH-UIS. (2025). *Alternativas biotecnológicas para la valorización de residuos agropecuarios generados en el páramo de berlín con fines energéticos y fertilización agraria.*
- Insam, H., Klammsteiner, T., & Gómez-Brandòn, M. (2023). Biology of compost. *Encyclopedia of Soils in the Environment, Second Edition: Volume 1-5, 1, V1-522-V1-532.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00178-6>
- Jiang, J., Liu, X., Huang, Y., & Huang, H. (2015). Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting. *Waste Management*, 39, 78–85. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.02.025>
- Kirov, G., Filizova, L., & Petrov, O. (1997). *Natural zeolites, Sofia '95 : proceedings of the Sofia Zeolite Meeting '95, June 18-25, 1995.* 300.
- Klammsteiner, T., Turan, V., Juárez, M. F. D., Oberegger, S., & Insam, H. (2020). Suitability of Black Soldier Fly Frass as Soil Amendment and Implication for Organic Waste Hygienization. *Agronomy 2020, Vol. 10, Page 1578, 10(10), 1578.* <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101578>
- Li, Z., Lu, H., Ren, L., & He, L. (2013). Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere*, 93(7), 1247–1257. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.06.064>
- Llosa Larrabure, J. R. (2023). *SEMBRANDO IDEAS, COSECHANDO PROYECTOS* *Transitar de una Motivación Reactiva a una Motivación Propositiva*

(Primera Edición). https://ia601801.us.archive.org/10/items/sembrando-ideas-cosechando-proyectos/Sembrando_ideas_cosechando_proyectos.pdf

Lombricompostaje Y Su Potencial Nutrimental En Jitomate Y Menta Jose Cruz Romero

Figuroa, P. DE, & México, E. DE. (2013.). *RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO EN EL MAESTRO EN CIENCIAS CAMPUS MONTECILLO POSTGRADO DE EDAFOLOGIA.*

Morales, A. B., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F. C., Moral, R., Ros, M., & Pascual,

J. A. (2016). Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained. *Journal of Cleaner Production*, 121, 186–197. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.012>

Moreno Casco, J. ., & Moral Herrero, R. . (2008). *Compostaje*. 572.

Nch2880 - Norma Chilena De Calidad De Compost [546gwy1zy8n8]. (2015.). Retrieved March 24, 2025, from <https://idoc.pub/documents/nch2880-norma-chilena-de-calidad-de-compost-546gwy1zy8n8>

NTC 5167 / PDF. (2022.). Retrieved March 24, 2025, from <https://es.scribd.com/document/451121592/NTC-5167>

Nunez, A. (2009). Turba y zeolita como soportes de inoculantes microbianos con acción

fertilizante. *Icidca Sobre Los Derivados De La Cana De Azucar*. https://www.academia.edu/98754078/Turba_y_zeolita_como_soportes_de_inoculantes_microbianos_con_acci%C3%B3n_fertilizante

Oviedo-Ocaña, E. R., Hernández-Gómez, A., Dominguez, I., Alexis Parra-Orobio, B., Soto-

Paz, J., & Sánchez, A. (2022a). Evaluation of Co-Composting as an Alternative for the Use of Agricultural Waste of Spring Onions, Chicken Manure and Bio-Waste

- Produced in Moorland Ecosystems. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 8720, 14(14), 8720. <https://doi.org/10.3390/SU14148720>
- Oviedo-Ocaña, E. R., Hernández-Gómez, A., Dominguez, I., Alexis Parra-Orobio, B., Soto-Paz, J., & Sánchez, A. (2022b). Evaluation of Co-Composting as an Alternative for the Use of Agricultural Waste of Spring Onions, Chicken Manure and Bio-Waste Produced in Moorland Ecosystems. *Sustainability (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148720>
- 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* 2021, Vol. 13, Page 1109, 13(3), 1109. <https://doi.org/10.3390/SU13031109>
- Pasda, N., Limtong, P., Oliver, R., Montange, D., & Panichsakpatana, S. (2005). Influence of Bulking Agents and Microbial Activator on Thermophilic Aerobic Transformation of Sewage Sludge. *Environmental Technology*, 26(10), 1127–1136. <https://doi.org/10.1080/09593332608618481>
- Pramanik, P., Ghosh, G. K., Ghosal, P. K., & Banik, P. (2007). Changes in organic – C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. *Bioresource Technology*, 98(13), 2485–2494. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2006.09.017>
- Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and

optimization strategies. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 77, 486–499.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.04.037>

Sánchez-Arias, V., López-Ruiz, J., Fernández, F. J., Rodríguez, L., & Villaseñor Camacho, J. (2009). Retención de amonio en el compostaje de lodos municipales con distintas zeolitas naturales. *Proceso y Destino Del Compost, Formación, Información e Interrelaciones Entre Los Agentes Del Sector: Ponencias y Comunicaciones de Las I Jornadas de La Red Española de Compostaje : 6, 7, 8 y 9 de Febrero de 2008, 2009, ISBN 9788469219935, Págs. 389-392, 389–392.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3999841>

Soudejani, H. T., Kazemian, H., Inglezakis, V. J., & Zorpas, A. A. (2019). Application of zeolites in organic waste composting: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101396. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2019.101396>

Suler, D. J., & Finstein, M. S. (1977). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, Continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Applied and Environmental Microbiology*, 33(2), 345–350.
<https://doi.org/10.1128/AEM.33.2.345-350.1977>

Venglovsky, J., Sasakova, N., Vargova, M., Pacajova, Z., Placha, I., Petrovsky, M., & Harichova, D. (2005). Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite. *Bioresource Technology*, 96(2), 181–189. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2004.05.006>

Vista del COMPOSTAJE AERÓBICO DE ESTIERCOL BOVINO Y POLLINAZA CON ADICIONES DE ZEOLITAS EN EL CULTIVAR DE CUCUMNO (Cucumis sativus) /

REVISTA DELOS. (2019.). Retrieved March 23, 2025, from
<https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/603/591>

Wang, B., Zhang, P., Guo, X., Bao, X., Tian, J., Li, G., & Zhang, J. (2024). Contribution of zeolite to nitrogen retention in chicken manure and straw compost: Reduction of NH₃ and N₂O emissions and increase of nitrate. *Bioresource Technology*, *391*, 129981.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2023.129981>

Wang, X., Feng, J., Haider, M. A., Xu, J., Sun, J., & Chen, Y. (2024). Study on the Effect of Conditioners on the Degradation of Tetracycline Antibiotics in Deer Manure Composting. *Fermentation*, *10*(11), 575.
<https://doi.org/10.3390/FERMENTATION10110575/S1>

Waqas, M., Nizami, A. S., Aburizaiza, A. S., Barakat, M. A., Asam, Z. Z., Khattak, B., & Rashid, M. I. (2019). Untapped potential of zeolites in optimization of food waste composting. *Journal of Environmental Management*, *241*, 99–112.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.04.014>