

Análisis del efecto de la zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama en el contexto del páramo de Berlín

Eduardo Andrés Pereira Rueda

Julián Blanco Mancipe

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ing. Sanitario, MSc, PhD

Codirector

María Fernanda Ríos Mercado

Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Ingeniería Civil
Bucaramanga
2025

Dedicatoria

A Dios Todopoderoso, fuente de sabiduría y fortaleza, por iluminar mi camino y acompañarme en cada paso de este proceso. Que mi vida y mi profesión estén siempre guiadas por su propósito, siendo este logro una manera de honrarlo.

A mis padres, Luz Amparo Rueda Rosas y Óscar Eduardo Pereira Paternina, por su amor incondicional, su ejemplo y los sacrificios que me permitieron llegar hasta aquí. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la disciplina; este triunfo es tanto mío como de ustedes.

A mis hermanos, quienes con su cariño y apoyo me recordaron siempre la importancia de la unión familiar. Este logro también les pertenece, porque forman parte esencial de mi vida.

A mis compañeros y amigos, Luis Eduardo y Daniel Felipe, con quienes compartí no solo retos académicos, sino aprendizajes de vida que enriquecieron mi formación personal y profesional. Más que colegas, hoy los considero parte de mi familia.

Y a mi fiel compañera de cuatro patas, Arya, que con su ternura, alegría y compañía constante hizo más llevadero este camino, recordándome que incluso en los momentos más exigentes siempre hay razones para sonreír.

Eduardo Andrés Pereira Rueda

Dedicatoria

A mi mamá, Elizabeth Mancipe, y a mi papá, Néstor Blanco, por ser la base de todo lo que soy y por acompañarme con su amor, apoyo y ejemplo en cada paso de este camino. Gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo, la paciencia y la fe en mí mismo, sin ustedes este logro no habría sido posible.

A mi perrita Maki, por ser mi compañía incondicional en los momentos de cansancio y desvelo, recordándome con su ternura que incluso en los días más difíciles siempre hay motivos para sonreír.

Este logro es tan mío como de ustedes.

Julián Blanco Mancipe

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Civil y a los docentes que contribuyeron a nuestra formación académica y profesional.

Al Ing. Sanitario, MSc, PhD, Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, por la confianza otorgada para la ejecución de este proyecto y por la orientación académica brindada.

A la co-directora, María Fernanda Ríos Mercado, por su asesoría y aportes técnicos al desarrollo del trabajo.

Al grupo de investigación GPH de la Escuela de Ingeniería Civil y al personal técnico de laboratorio por su colaboración en las actividades requeridas.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Revisión de literatura	16
2.1 Compostaje	16
2.1.1 Fase I o mesofílica (10-40°C).....	16
2.1.2 Fase II o termofílica (40-75°C).....	17
2.1.3 Fase III (mesofílica II o de enfriamiento).....	17
2.1.4 Fase IV o de maduración	17
2.2 Factores que influyen en el compostaje	18
2.3 Zeolita y su aplicación en el compostaje	20
3. Metodología	23
3.1 Fase I: Efecto de la incorporación de zeolita sobre la eficiencia del proceso de co-compostaje de estiércol de pollo con co-sustratos orgánicos.....	23
3.1.1 Molienda de zeolita para incorporación en estado sólido y solución acuosa	23
3.1.2 Caracterización de los co-sustratos y la zeolita	23
3.1.3 Montaje experimental	24
3.1.4 Monitoreo del proceso	26
3.2 Fase II: Efecto de la incorporación de zeolita sobre la eficiencia del proceso de co-compostaje de estiércol de pollo con co-sustratos orgánicos.....	29

4. Resultados	30
4.1 Temperatura	30
4.2 pH.....	31
4.2.1 Conductividad eléctrica	33
4.2.2 Sólidos volátiles	35
4.3 Índice de Germinación (IG)	37
4.4 Contenido de nutrientes	39
4.5 Análisis del efecto de los co-sustratos en la calidad del producto final del co-compostaje ...	41
5. Conclusiones.....	44
6. Recomendaciones	45
Referencias Bibliográficas	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Parámetros iniciales de los co-sustratos.....	24
Tabla 2 Distribución de sustratos y zeolita en la mezcla.	25
Tabla 3 Parámetros fisicoquímicos.	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Montaje experimental.....	25
Figura 2 Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje.....	30
Figura 3 Perfil de pH en el proceso de compostaje.	32
Figura 4 Perfil de conductividad eléctrica en el proceso de compostaje.	34
Figura 5 Perfil de sólidos volátiles del compostaje.	36
Figura 6 Perfil de índice de germinación del compostaje.....	38
Figura 7 Porcentaje de carbono orgánico total en cada etapa del compostaje.....	39
Figura 8 Porcentaje de nitrógeno total de cada tratamiento en las etapas del compostaje.	40

Glosario

Compostaje: Proceso biológico de descomposición controlada de materia orgánica, como restos de comida o vegetales, hasta convertirse en compost, un abono natural rico en nutrientes.

Eficiencia térmica: Proceso biológico de descomposición controlada de materia orgánica, como restos de comida o vegetales, hasta convertirse en compost, un abono natural rico en nutrientes.

Índice de germinación: Proceso biológico de descomposición controlada de materia orgánica, como restos de comida o vegetales, hasta convertirse en compost, un abono natural rico en nutrientes.

Madurez del compost: Grado en que el compost ha completado su proceso de descomposición, siendo estable y seguro para usarse en plantas sin efectos negativos.

Páramo: Ecosistema de alta montaña característico de regiones tropicales, con clima frío, vegetación adaptada y gran importancia en la captación de agua.

Residuos orgánicos: Desechos de origen biológico, como restos de alimentos o plantas, que pueden descomponerse naturalmente y ser utilizados en procesos como el compostaje.

Sólidos volátiles: Fracción de la materia orgánica en un residuo que se pierde al ser calentada a altas temperaturas, usada para medir el contenido biodegradable.

Zeolita: Mineral poroso con capacidad de absorber agua, gases y nutrientes; se usa en el compostaje para reducir olores y mejorar la calidad del abono.

Resumen

Título: Análisis del efecto de la zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama en el contexto del páramo de Berlín.*

Autor: Eduardo Andrés Pereira Rueda, Julián David Blanco Mancipe.**

Palabras Clave: Compostaje, zeolita, residuos orgánicos, madurez del compost, páramo, eficiencia térmica, índice de germinación, sólidos volátiles.

Descripción: La investigación realizada tuvo como objetivo evaluar el efecto de la incorporación de zeolita en dos formas de aplicación (sólida y en solución acuosa) sobre la eficiencia del proceso de compostaje de estiércol de pollo y residuos vegetales (cebolla de rama). Para ello, se establecieron tres tratamientos experimentales: control sin adición de zeolita (TC), con zeolita sólida (TZS) y con zeolita en solución acuosa (TZL). Durante el monitoreo del proceso se registraron variables fisicoquímicas y biológicas claves, incluyendo temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos volátiles (SV), índice de germinación (IG), prueba de autocalentamiento (PA) y calidad final del compost. Los resultados indicaron que TZS promovió un inicio más rápido del compostaje, con temperaturas pico de 64.5 °C en la fase termofílica, superiores a las registradas en TC (59.9 °C) y TZL (59.6 °C), favoreciendo la actividad microbiana y la retención térmica. Además, TZS presentó una mayor reducción de sólidos volátiles (561%p/p), menor variabilidad en CE (3.5–4.0 mS/cm) y un contenido superior de nitrógeno total (2.69 %), en comparación con TC (2.54%). Aunque todos los tratamientos alcanzaron niveles de madurez aceptables según la norma colombiana NTC 5167, el tratamiento con adición de zeolita sólida destacó por una mejor calidad del producto final, evidenciada en mayores contenidos de nutrientes, mayor reducción de SV y una composición más estable del compost, lo que demuestra que la zeolita, especialmente en su forma sólida, constituye una alternativa eficiente y sostenible para optimizar el compostaje de residuos orgánicos, mejorar la retención de nutrientes, acelerar la estabilización del compost y reducir el impacto ambiental asociado.

* Degree Work

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ing. Sanitario, MSc, PhD. Codirector: María Fernanda Ríos Mercado. Ing. Civil

Abstract

Title: Analysis of the effect of zeolite on the co-composting of chicken manure and scallion residues in the context of the Paramo de Berlin *

Author: Eduardo Andrés Pereira Rueda, Julián Blanco Mancipe **

Key Words: composting, zeolite, organic waste, compost maturity, paramo, thermal efficiency, germination index, volatile solids.

Description: This research aimed to evaluate the effect of zeolite incorporation in two application forms (solid and aqueous solution) on the efficiency of the composting process of poultry manure and plant residues (green onion). Three experimental treatments were established: control without zeolite addition (TC), solid zeolite (TZS), and aqueous zeolite solution (TZL). Throughout the monitoring process, key physicochemical and biological variables were recorded, including temperature, pH, electrical conductivity (EC), volatile solids (VS), germination index (GI), self-heating test (PA), and final compost quality. The results indicated that TZS promoted a faster start of composting, reaching peak temperatures of 64.5 °C during the thermophilic phase, higher than those recorded in TC (59.9 °C) and TZL (59.6 °C), favoring microbial activity and thermal retention. Additionally, TZS showed greater reduction of volatile solids (561%w/w), lower variability in EC (3.5–4.0 mS/cm), and a higher total nitrogen content (2.69 %) compared to TC (2.54%). Although all treatments achieved acceptable maturity levels according to the Colombian NTC 5167 standard, the treatment with solid zeolite addition had a better quality of the final product, evidenced by higher nutrient content, greater reduction of VS, and a more stable compost composition. These findings demonstrate that zeolite, especially in its solid form, is an efficient and sustainable amendment for optimizing organic waste composting, enhancing nutrient retention, accelerating compost stabilization, and reducing the environmental impact associated with the process.

* Degree Work

** Physic-mechaninc Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Codirector: María Fernanda Ríos Mercado. Civil Eng.

Introducción

Los páramos son ecosistemas de alta montaña que desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico y en el suministro de agua a las comunidades cercanas (Schild & Sharma, 2011). En este contexto, el sistema de páramos donde se encuentra el páramo de Berlín, también conocido como parte del complejo de Santurbán, representa la principal fuente de abastecimiento hídrico para Bucaramanga y su área metropolitana (Acevedo-Tarazona, 2020).

Sin embargo, esta región enfrenta crecientes presiones ambientales derivadas de actividades agropecuarias intensivas, en particular por la producción de cebolla larga, que se ha convertido en la principal actividad económica local, generando aproximadamente 180.000 toneladas anuales para abastecer mercados urbanos (Oviedo Ocaña et al., 2022). Las prácticas agrícolas predominantes incluyen el uso de fertilizantes sintéticos y la aplicación directa de estiércol de pollo sin tratamiento previo. Aunque estos insumos son esenciales para garantizar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria, su uso excesivo y descontrolado conlleva impactos ambientales significativos, como la degradación del suelo y la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos debido a la lixiviación de nutrientes (Zhang et al., 2015).

Además, la acumulación y descomposición inadecuada de residuos orgánicos en el páramo contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), incluyendo dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y amoníaco (NH_3), intensificando así el impacto ambiental de la actividad agropecuaria (Campitelli et al., 2014).

En respuesta a esta problemática, el co-compostaje de residuos orgánicos se ha consolidado como una estrategia efectiva a nivel global para transformar residuos biodegradables en productos con valor agronómico. Este método permite tratar simultáneamente diferentes tipos de residuos, reducir las emisiones gaseosas y minimizar la pérdida de nutrientes durante el proceso de

compostaje (Hwang et al., 2020). Sin embargo, el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama, sin la incorporación de aditivos, presenta limitaciones como una alta volatilización de amoníaco, baja retención de nutrientes y limitada calidad del compost final (Campitelli et al., 2014).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de zeolita (un mineral natural con alta capacidad de intercambio iónico y adsorción) puede mitigar significativamente la liberación de gases como NH_3 y otros GEI durante el compostaje (Soudejani et al., 2019). Además, la zeolita contribuye a reducir la salinidad del compost, adsorber metales pesados y estabilizar parámetros fisicoquímicos como el pH y la conductividad eléctrica, mejorando así la eficiencia del proceso y la calidad del producto final (Chan et al., 2016).

Aunque la eficacia de la zeolita granular ha sido previamente estudiada, aún existe un conocimiento limitado sobre los efectos de su aplicación en presentaciones con menor tamaño de partícula, como polvo fino o suspensiones acuosas. Estas formas, al contar con mayor área superficial específica, podrían mejorar la retención de amonio (NH_4^+), promover una transformación más eficiente de la materia orgánica y favorecer una distribución más homogénea dentro de la mezcla compostada, optimizando factores clave como la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos responsables de la descomposición (Manu et al., 2022; Spyridonidis et al., 2022).

Teniendo en cuenta las prácticas agrícolas inadecuadas en el páramo de Berlín, se propone explorar el uso de zeolita como enmienda en el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama. Esta investigación se enmarca dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), al reducir la lixiviación de nutrientes que afectan la calidad del agua; el ODS 12 (producción y consumo responsables), al disminuir el

uso de fertilizantes químicos y fomentar la reutilización de residuos orgánicos; y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres), al contribuir a la recuperación y sostenibilidad del suelo.

Frente a este panorama, se plantean las siguientes preguntas de investigación: **¿Qué efecto tiene la zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama?, ¿Cuál es la dosis óptima y la forma de aplicación necesaria para obtener resultados favorables?**

Este proyecto busca dar respuesta a estas preguntas, promoviendo el aprovechamiento de residuos agropecuarios generados en el páramo de Berlín, y se articula con las líneas de investigación del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH-UIS).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el efecto de la zeolita en el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama en el contexto del páramo de Berlín

1.2 Objetivos Específicos

Analizar el efecto de la zeolita y sus formas de aplicación en el proceso de co-compostaje de estiércol de pollo y residuos del cultivo de cebolla de rama.

Analizar el efecto de la zeolita y sus formas de aplicación sobre la calidad del co-compostaje de estiércol del pollo y residuos de cultivo de cebolla de rama.

2. Revisión de literatura

2.1 Compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico mediante el cual los microorganismos transforman residuos orgánicos en un producto estabilizado, conocido como compost, útil como enmienda o fertilizante orgánico. Este proceso ocurre en condiciones controladas de temperatura, humedad, oxígeno y relación carbono/nitrógeno, generando CO₂, vapor de agua y calor. El compostaje se divide en varias fases: una mesofílica inicial (~20–40 °C), una termofílica (~50–70 °C), seguida por una etapa de enfriamiento y una fase final de maduración. Durante la fase termofílica, se produce la mayor actividad microbiana, lo que contribuye a la descomposición de materia orgánica compleja (como celulosa y proteínas) y a la higienización del material mediante la eliminación de patógenos y semillas viables (Haug, 2018; Meena et al., 2021).

Sin embargo, uno de los principales desafíos en esta etapa es la pérdida de nitrógeno, especialmente en forma de NH₃, cuando se emplean residuos con alta carga nitrogenada como el estiércol pollo. Estas pérdidas reducen la calidad agronómica del compost y pueden generar emisiones contaminantes, contribuyendo al deterioro ambiental y la ineficiencia del proceso (Campitelli et al., 2014).

2.1.1 Fase I o mesofílica (10-40°C)

En la etapa inicial del compostaje, los compuestos fácilmente degradables son descompuestos por hongos y bacterias que pueden trabajar a temperaturas moderadas (20-35°C) (Ryckeboer et al., 2003). en esta fase se degradan rápidamente los compuestos fácilmente degradables, lo que genera aumentos en la temperatura y da paso a la fase termofílica (Insam et al., 2023).

2.1.2 Fase II o termofílica (40-75°C)

Con el aumento de la temperatura, los organismos termofílicos reemplazan a los mesófilos. La diversidad bacteriana disminuye, pero las actinobacterias termofílicas aumentan a 45-55°C (Amner et al., 1988; Beffa et al., 1996). Esto acelera la descomposición y eleva la temperatura a unos 62°C, beneficiando a las bacterias en lugar de los hongos. Temperaturas superiores a 60°C inhiben el crecimiento de hongos, pero estos pueden sobrevivir como esporas. Las levaduras regresan a 54°C (Ryckeboer et al., 2003).

2.1.3 Fase III (mesofílica II o de enfriamiento)

Cuando los sustratos fáciles de descomponer se agotan, la temperatura disminuye y los microorganismos mesofílicos vuelven a colonizar el sustrato. Pueden surgir de esporas sobrevivientes, propagarse desde lugares protegidos o ser transportados por el aire. En esta fase de temperatura media, los sustratos disponibles son diferentes de los de la etapa inicial y consisten en gran parte en productos de degradación secundaria y materiales resistentes como almidón, celulosa, lignina y células microbianas inactivadas por el calor (Insam et al., 2023).

2.1.4 Fase IV o de maduración

En la fase de maduración, microorganismos especializados con enzimas como ligninasas, peroxidasas y celulasas descomponen lignina, celulosa y otros compuestos resistentes. Durante esta etapa, se generan ácidos húmicos a partir de compuestos aromáticos derivados de la lignina o por síntesis. La materia húmica es un componente valioso del compost. En este período, los hongos empiezan a dominar sobre las bacterias, siendo *Arthrobacter* una fracción numéricamente importante de estas últimas (Beffa et al., 1996).

2.2 Factores que influyen en el compostaje

La eficiencia del compostaje depende de múltiples factores físicos, químicos y biológicos, que interactúan entre sí y determinan tanto la velocidad como la calidad del proceso.

Uno de los factores clave es la temperatura, la cual refleja la intensidad de la actividad microbiana. Las fases mesofílica y termofílica tienen funciones específicas: la primera inicia el proceso degradativo, y la segunda promueve la higienización y la descomposición de compuestos más complejos. Temperaturas sostenidas por encima de 55 °C por varios días son necesarias para garantizar una sanitización eficaz del compost (Meena et al., 2021; Özcan et al., 2021).

La humedad recomendada oscila durante las dos primeras fases del compostaje oscila entre el 50% y 60%. valores inferiores detienen la actividad biológica, mientras que excesos pueden generar condiciones anaerobias y lixiviación de nutrientes. La zeolita, debido a su estructura microporosa, puede ayudar a regular la humedad, actuando como reservorio de agua en momentos críticos (Soudejani et al., 2019; Özcan et al., 2021).

La aireación también es esencial. Mantener un adecuado contenido de oxígeno en la mezcla permite el predominio de procesos aeróbicos, evitando la producción de gases malolientes como sulfuro de hidrógeno o metano. Esto puede lograrse mediante el volteo regular del compost o el uso de aditivos estructurantes que mejoren la porosidad (Özcan et al., 2021).

Otro factor importante es la relación carbono/nitrógeno (C/N). Un rango inicial entre 25:1 y 30:1 se considera ideal; desviaciones pueden ralentizar la degradación (por exceso de carbono) o generar pérdidas por volatilización de NH_3 (por exceso de nitrógeno) (Campitelli et al., 2014).

El pH también varía durante el proceso: tiende a aumentar al inicio por la formación de amoníaco y se estabiliza en la maduración. Valores entre 6.5 y 8.0 son considerados óptimos para

la actividad microbiana. La zeolita puede actuar como *buffer*, atenuando fluctuaciones bruscas de pH durante la fase activa (Xu et al., 2025).

En cuanto a la estructura del sustrato, el tamaño de partícula afecta la aireación y la superficie disponible para los microorganismos. Materiales muy finos pueden compactarse, dificultando el flujo de oxígeno; en cambio, los muy gruesos limitan la eficiencia de la descomposición por menor área expuesta (Özcan et al., 2021).

Aunque no son factores que controlen el proceso directamente, los sólidos volátiles (SV) y el índice de germinación (IG) son parámetros que permiten monitorear el avance del compostaje. La reducción de SV refleja la biodegradación efectiva de la materia orgánica, y el IG indica la presencia o ausencia de fitotóxicos en el producto final. La zeolita, al mejorar las condiciones internas del proceso, ha demostrado contribuir a una mayor reducción de SV y a valores de IG superiores al 80%, considerado umbral de madurez agronómica (Manu et al., 2022; Doni et al., 2024).

Otro indicador clave de estabilidad es la prueba de autocalentamiento, que mide la generación de calor por actividad microbiana residual. Compost con zeolita suele presentar menor incremento térmico en esta prueba, lo que indica una estabilización más rápida del material (Doni et al., 2024; Eric Brinton et al., 1995).

Por último, la actividad microbiana y el tiempo de compostaje son aspectos críticos. La presencia de bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos determina el éxito del proceso, y su dinámica está influenciada por todos los factores anteriores. El tiempo requerido para alcanzar un compost maduro puede variar entre 30 y 120 días. El uso de aditivos como la zeolita puede acortar significativamente este periodo, al mejorar las condiciones internas del sustrato (Zhang y Sun, 2015; Xu et al., 2025).

2.3 Zeolita y su aplicación en el compostaje

Las zeolitas son minerales aluminosilicatos cristalinos con estructura tridimensional microporosa, compuesta por tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos de oxígeno. Esta configuración confiere a las zeolitas una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y una notable habilidad para adsorber compuestos como NH_4^+ , metales pesados y moléculas orgánicas volátiles (Noori et al., 2005). En el contexto del compostaje, estas propiedades resultan particularmente útiles para reducir las emisiones gaseosas, conservar nutrientes y mejorar las condiciones fisicoquímicas del sustrato (Soudejani et al., 2019; Álvarez Ayuso et al., 2003).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de zeolita al proceso de compostaje puede disminuir la pérdida de nitrógeno por volatilización, estabilizar el pH, incrementar la retención de agua y mejorar la aireación del material. Estas mejoras están directamente relacionadas con el incremento de la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Por ejemplo, Zhang y Sun (2015) evaluaron el uso de clinoptilolita al 25% en un compostaje en dos etapas de residuos verdes, y observaron una prolongación de la fase termofílica, mayor actividad enzimática, reducción de tiempo de maduración y mejoras significativas en parámetros agronómicos como el índice de germinación.

Asimismo, Xu et al. (2025) encontraron que la aplicación conjunta de zeolita y biochar en compostaje de estiércol de ciervo promovió una mayor retención de nitrógeno (hasta 39.55 g/kg), mayor disponibilidad de fósforo y un cambio en la comunidad microbiana, favoreciendo géneros como *Ascomycota* y *Proteobacteria*, e inhibiendo *Firmicutes*. Este cambio microbiano no solo mejoró la descomposición de la materia orgánica, sino que también aceleró la estabilización del compost, lo que reduce el tiempo necesario para alcanzar un producto maduro y estable.

Por su parte, los estudios pioneros de Liu y Lo (2001) evidenciaron que la zeolita en polvo posee una capacidad superior de adsorción de amonio en comparación con la granulada, alcanzando hasta 17.81 mg $\text{NH}_4^+\text{-N/g}$ en condiciones de laboratorio y una eficiencia un 20% mayor en sistemas de flujo continuo. Esta diferencia se atribuye a su mayor superficie específica, lo que permite una interacción más directa con el lixiviado rico en nitrógeno. No obstante, en aplicaciones a escala real, debe considerarse el riesgo de colmatación o compactación si no se regula adecuadamente la dosis o se combina con aditivos estructurantes.

Diferentes investigaciones han explorado diversas formas de zeolita para su aplicación en compostaje, incluyendo modificaciones físicas o químicas, como lavados con agua destilada o tratamientos térmicos previos a su aplicación. Estas modificaciones buscan mejorar la capacidad de adsorción y la interacción con el sustrato, aumentando su eficacia para la retención de nutrientes y la reducción de gases de efecto invernadero, como sugieren Waqas et al. (2019). Aunque existen estudios sobre el uso de zeolita en fase acuosa en la agricultura (Rodríguez, 2015), no se han identificado investigaciones que evalúen su aplicación en el compostaje de residuos orgánicos. En este montaje experimental, la zeolita fue utilizada en forma sólida, tras ser sometida a una molienda final y un pretratamiento, con el objetivo de potenciar su acción adsorbente y optimizar la calidad final del compost.

Además de su efecto durante el proceso, la zeolita también mejora las propiedades del compost final. Doni et al. (2024) reportaron que la inclusión de zeolita en compost de residuos vinícolas, redujo la conductividad eléctrica, aumentó el índice de germinación y disminuyó la salinidad, elementos críticos para la aceptabilidad del compost en agricultura. Estas mejoras también están alineadas con los parámetros establecidos en normativas como la NTC 5167 (Colombia) y la NCh 2880 (Chile) (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2003; ICONTEC,

2022), que valoran la estabilidad, madurez, fitotoxicidad y contenido nutricional como criterios de calidad compostable.

La aplicación de zeolita en el compostaje, especialmente en su forma pulverizada constituye una estrategia efectiva para optimizar la eficiencia del proceso y mejorar la calidad del compost (Barrera y Núñez, 2022). Su capacidad para regular condiciones internas del sistema, adsorber compuestos tóxicos y conservar nutrientes la convierte en una herramienta altamente recomendable, especialmente en compostajes con alto contenido nitrogenado como los que incorporan estiércol de pollo. No obstante, el formato de aplicación (sólida o líquida) debe ajustarse según los objetivos del sistema y las características del sustrato para garantizar su efectividad.

3. Metodología

El experimento se realizó en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón del campus principal de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga.

3.1 Fase I: Efecto de la incorporación de zeolita sobre la eficiencia del proceso de co-compostaje de estiércol de pollo con co-sustratos orgánicos

3.1.1 Molienda de zeolita para incorporación en estado sólido y solución acuosa

Para el desarrollo de este estudio, se adquirió zeolita comercial en la ciudad de Bogotá, la cual fue transportada posteriormente a la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (UIS), ubicada en Piedecuesta, Santander. Posteriormente fue sometida a un proceso de molienda utilizando un molino planetario RETSCH PM1000, empleando un recipiente de óxido con una capacidad de 500 mL, hasta lograr partículas con un tamaño de 300 nm. Luego de este procedimiento, las partículas fueron almacenadas en un horno a 105 °C para evitar que absorbieran humedad.

3.1.2 Caracterización de los co-sustratos y la zeolita

El sustrato base correspondió a estiércol de pollo (EP) proveniente de una granja local, complementado con residuos orgánicos entre los que se incluyeron cebolla en rama (CR) en estado inicial de descomposición, y aserrín (As) empleado como material estructurante en un 14 %. Asimismo, se incorporó un 1 % de roca fosfórica (RF), dado que estudios previos del grupo GPH evidenciaron una deficiencia de fósforo en mezclas similares de EP con CR y otros biorresiduos (Oviedo Ocaña et al., 2022), lo cual hizo necesaria la adición de una fuente fosfatada para garantizar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la norma NTC 5167 (ICONTEC, 2022).

Tabla 1

Parámetros iniciales de los co-sustratos

Material	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Humedad (%)	SV(g/kg)
Estiércol de pollo	9.02	1494	24	776
Cebolla de rama	5.05	179.8	94	833
Aserrín	4.66	26.1	7	620
Zeolita	9.63	68.2	-	-

Nota: *CE: Conductividad eléctrica, SV: Sólidos volátiles

La caracterización de los co-sustratos muestra contrastes relevantes que condicionan el proceso de compostaje. El estiércol de pollo presentó un pH alcalino (>8) y alta conductividad eléctrica, lo que sugiere riesgo de pérdidas por volatilización de amoníaco (Paterlini et al., 2017). Por otro lado, la cebolla de rama mostró un pH ácido (~ 5) y humedades superiores al 85%. El aserrín, con baja humedad (7%) y alta proporción de sólidos totales, actúa como agente estructurante al mejorar la porosidad de la mezcla y favorecer la aireación. En conjunto, la combinación de estos co-sustratos requiere un ajuste balanceado para regular el pH, garantizar un contenido óptimo de humedad y permitir una adecuada descomposición de la materia orgánica, lo cual es esencial para lograr un compost de alta calidad.

3.1.3 Montaje experimental

Se implementó un sistema en escala de laboratorio, utilizando reactores de 250 litros, diseñados para procesar hasta 40 kg de residuos orgánicos. Estos reactores fueron adaptados para permitir una aireación de tipo pasivo, siguiendo el enfoque propuesto por Rawottee et al. (2017) cómo se ilustra en las Figura 1. Adicionalmente, se les incorporó un recubrimiento térmico con el fin de conservar el calor generado durante la descomposición de los co-sustratos.

Se establecieron un total de 3 tratamientos experimentales, cada tratamiento con su respectivo duplicado para evaluar el efecto de la zeolita sobre el compostaje de estiércol de pollo

(EP) y residuos de cebolla de rama (CR) sobre el proceso y calidad del compost final, usando aserrín (As) y roca fosfórica (RF) como material de soporte y enmienda, respectivamente. Las proporciones se definieron con base en balances de masa y en el criterio de mantener una relación C/N entre 20 y 25 (Oviedo Ocaña et al., 2017). A continuación, se detallan las distribuciones empleadas en cada uno de los tratamientos.

Tabla 2

Distribución de sustratos y zeolita en la mezcla.

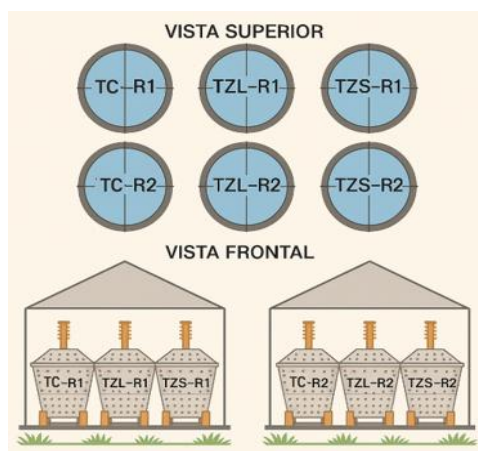
Tratamiento	Composición Principal	Tipo de aplicación
TC	62% EP + 23% CR + 14% As + 1% RF	Sin zeolita (control)
TZS	61% EP + 22% CR + 14% As + 1% RF + 2% Zeolita (p/p)	Zeolita sólida
TZL	61% EP + 22% CR + 14% As + 1% RF + 2% Zeolita (p/v)	Zeolita en solución acuosa 20 g/L

Nota: *TC: Tratamiento control, TZS: Tratamiento con zeolita sólida, TZL: Tratamiento con zeolita en solución acuosa, EP: Estiércol de pollo, CR: Cebolla en rama, As: Aserrín, RF: Roca fosfórica.

Los reactores se armaron sobre superficies elevadas y ventiladas, protegidas con mallas de sombreo para evitar el lavado por lluvia. En la Figura 1 se ilustra el montaje realizado.

Figura 1

Montaje experimental



3.1.4 Monitoreo del proceso

El monitoreo del proceso de compostaje inició inmediatamente después del montaje experimental (17 de febrero de 2024). Durante el proceso se realizó seguimiento a variables fisicoquímicas como temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), humedad, contenido de sólidos volátiles (SV), nitrógeno total (NT), carbono orgánico total (COT) e índice de germinación. La temperatura fue registrada **dos veces al día durante las fases mesofílica y termofílica**, y posteriormente **una vez al día** hasta el final del proceso, utilizando un termómetro de varilla introducido a una profundidad aproximada de 30 cm en cinco puntos por reactor (cuatro periféricos y uno central), conforme a protocolos establecidos en la literatura (Oviedo Ocaña et al., 2017). Por su parte, variables como pH, CE, SV y humedad fueron medidas diariamente solo durante los primeros 15 días del proceso; posteriormente, su frecuencia se redujo a tres veces por semana durante las fases de enfriamiento y maduración. Las muestras se recolectaron inicialmente a diario en todos los reactores, y luego cada 2 a 4 días, aplicando un protocolo de muestreo compuesto. La humedad se controló cuidadosamente para mantenerla dentro del rango óptimo de 40 % a 60 %, evitando descensos por debajo del límite inferior, de acuerdo con lo señalado por Reyes-Torres et al. (2018).

Se supervisó cuidadosamente la humedad para evitar que los valores en los reactores se aproximaran al umbral mínimo del 40 %.

La determinación del pH y la conductividad eléctrica (CE) se realizó a partir de una submuestra sólida tomada de cada reactor, la cual fue diluida en agua destilada en una relación fija de 1:10 (peso/volumen). La mezcla resultante fue analizada utilizando un medidor multiparamétrico previamente calibrado, con el fin de obtener valores precisos. El contenido de sólidos volátiles (SV) fue cuantificado mediante el método gravimétrico por calcinación, que

consistió en someter la muestra a una temperatura constante de 550 °C en un horno mufla, siguiendo el protocolo descrito por Zhang y Sun (Zhang y Sun, 2015). Para el análisis de los resultados, se utilizaron los datos obtenidos de los tres tratamientos principales (TC, TZS y TZL) junto con sus réplicas. Posteriormente, se calculó el promedio de cada parámetro por tratamiento, con el propósito de asegurar una caracterización cuantitativa precisa del comportamiento fisicoquímico del material en estudio.

El volteo de las pilas se efectuó a lo largo de todo el proceso de compostaje, adaptándose a la evolución de la temperatura y al contenido de humedad. Durante la fase activa, especialmente en la etapa termofílica, se realizaron volteos frecuentes con el fin de mantener condiciones aeróbicas, evitar la compactación de la mezcla y lo que favoreció la descomposición eficiente del material. En la etapa de maduración, esta operación se continuó con menor frecuencia para permitir la homogeneización y el adecuado curado de la mezcla (Soto Paz et al., 2022). Los requerimientos de agua se estimaron mediante la **ecuación 1**,

$$\text{Ecuación 1: Humectación} = (F_{ad} - F_{ap}) \times \frac{P_{tc}}{\rho_a}$$

- F_{ad} = Fracción de agua deseada (%)
- F_{ap} = Fracción de agua presente en la muestra (%)
- P_{tc} = Peso total del compostaje (g)
- ρ_a = densidad del agua (g/L)

aplicando las cantidades necesarias para conservar niveles óptimos de humedad, mejorando así la degradación y la oxigenación del sustrato (Reyes Torres et al., 2018).

Con el propósito de determinar la estabilidad y el grado de madurez del material en proceso de co-compostaje, se aplicó el índice de germinación (IG) como parámetro bioindicador de la transformación adecuada de la materia orgánica. Esta medición se realizó al inicio de cada fase del

proceso, considerando como valor umbral de madurez un IG superior al 80 %, lo cual indica ausencia de fitotoxicidad en el producto final, según lo establecido por Riffaldi et al. (1986). Para la ejecución del ensayo se emplearon nueve cajas de Petri, distribuidas en tres por tratamiento. El material orgánico de cada reactor fue diluido en agua destilada utilizando una proporción 1:10 (peso/volumen), posteriormente decantado y filtrado para obtener un extracto líquido. A cada caja se le añadieron 10 semillas de rábano, seleccionadas por su alta sensibilidad a compuestos fitotóxicos, lo que facilita la detección de posibles inhibidores de la germinación y el desarrollo radicular (Komilis y Tziouvaras, 2009; Díaz Vergara et al., 2021). Adicionalmente, se incluyeron tres cajas de Petri con semillas tratadas únicamente con agua destilada, utilizadas como grupo control, con el fin de aplicar las ecuaciones correspondientes (2, 3 y 4), según el protocolo descrito por Varnero et al. (2007).

$$\textbf{Ecuación 2} : \%Gr = \frac{\#semillas\ germinadas\ en\ la\ solución}{\#de\ semillas\ germinadas\ en\ el\ blanco} \times 100$$

$$\textbf{Ecuación 3} : CRr = \frac{Elongación\ de\ la\ raíz\ en\ la\ solución}{Elongación\ de\ la\ raíz\ en\ el\ blanco} \times 100$$

$$\textbf{Ecuación 4} : IG = \frac{\%Gr \times CRr}{100}$$

- PGR: Porcentaje de germinación relativo (%)
- CRr: Crecimiento de raíz relativo (cm)
- IG: Índice de germinación (%)

La prueba de autocalentamiento permitió evaluar la estabilidad del compost a partir de las variaciones térmicas generadas por la actividad biológica residual. De acuerdo con los resultados obtenidos, los tres tratamientos presentaron un ΔT dentro del rango de 0 °C a 10 °C, lo que, según la clasificación de Rottegrad, corresponde a la clase V. Esta categoría indica que el compost se encuentra en un estado de madurez y estabilidad óptimo, es decir, el proceso de compostaje ha

finalizado adecuadamente [10]. Esta prueba se llevó a cabo empleando vasos Dewar modificados y termometría convencional, midiendo la variación térmica entre una muestra de compost aislada y la temperatura ambiente tras un periodo de incubación de 72 horas, extendido en algunos casos a 10 días, con el fin de detectar actividad biológica remanente (Eric Brinton et al., 1995).

El compostaje se consideró concluido cuando la temperatura del material descendió de forma sostenida hasta alcanzar valores equivalentes al promedio térmico ambiental de Bucaramanga (24 ± 2 °C), lo cual ocurrió en el día 79 del proceso.

3.2 Fase II: Efecto de la incorporación de zeolita sobre la eficiencia del proceso de co-compostaje de estiércol de pollo con co-sustratos orgánicos

Una vez finalizado el proceso de compostaje, el material fue trasladado al laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química, donde fue triturado con molino de cuchillas y posteriormente tamizado utilizando una malla ASTM N.º 35 (0,5 mm), en cumplimiento de los lineamientos establecidos por la norma técnica colombiana NTC 5167 (ICONTEC, 2022). De cada tratamiento se recolectó una muestra representativa de 1 kg, la cual fue almacenada bajo refrigeración a 3–4 °C y enviada a los laboratorios especializados de la Universidad de Antioquia para su respectiva caracterización. Los análisis realizados incluyeron la determinación de humedad, pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos volátiles (SV), índice de germinación (IG), contenido total de nitrógeno, carbono orgánico total, fósforo total, cenizas, relación C/N y análisis microbiológico de coliformes fecales, totales y *Salmonella* sp. Los resultados obtenidos fueron contrastados con los valores de referencia definidos por la NTC 5167 (ICONTEC, 2022), a fin de evaluar la calidad, estabilidad y potencial agronómico del compost.

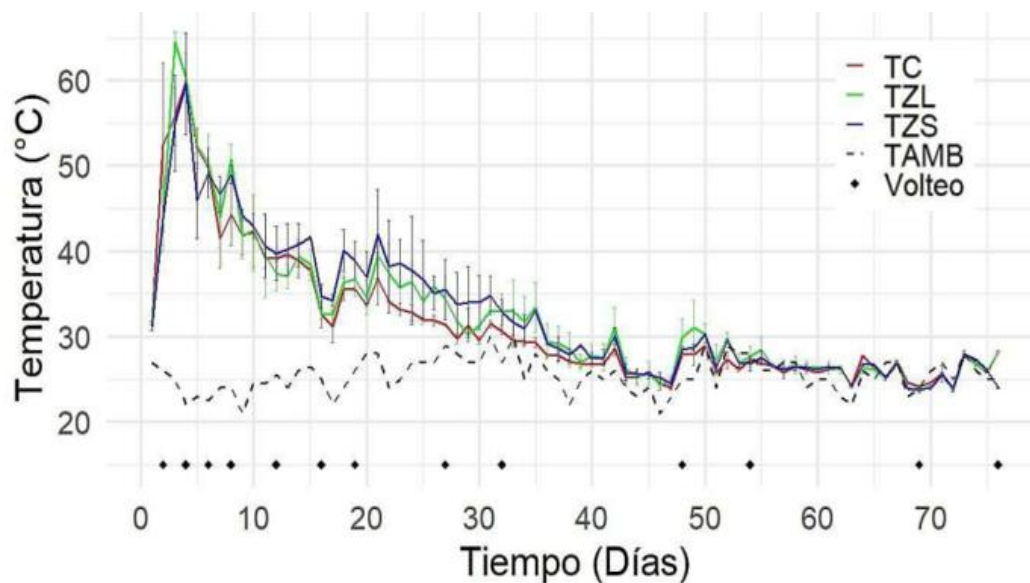
4. Resultados

4.1 Temperatura

En la Figura 2 se presentan los perfiles de temperatura para cada tratamiento, junto con los datos de temperatura ambiental y la frecuencia de los volteos manuales realizado en los reactores.

Figura 2

Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje.



La evolución térmica observada en los tres tratamientos (TC, TZS, TZL) confirmó una adecuada activación microbiana al inicio del proceso, con temperatura máximas superior a 60 °C durante la fase termofílica (días 0–6) en TZS (zeolita sólida) ya que alcanzó el mayor pico (~64.5 °C), seguido por TC (59,9 °C) y TZL (59.6 °C), lo que sugiere que la incorporación de zeolita potenció la actividad biológica, posiblemente por su capacidad de adsorber compuestos tóxicos como amonio y mejorar las condiciones de aireación y humedad (Doni et al., 2024).

Durante el enfriamiento (días 7–35), TZS mantuvo temperaturas más estables, lo que indica una mayor eficiencia en la oxidación biológica de la materia orgánica. Este comportamiento

coincide con lo reportado por Madrini et al. (2016). Además, el estudio de Huang et al. (2020) destaca que la zeolita natural puede actuar como catalizador, disminuyendo la formación de compuestos no deseados durante la descomposición térmica de residuos nitrogenados, lo que también podría explicar la estabilidad térmica alcanzada en **TZS**.

En la fase de maduración (días 36–77), los tres tratamientos tendieron a estabilizarse térmicamente. Sin embargo, tanto **TZS** como **TZL** conservaron una ligera inercia térmica, indicando una prolongación de la actividad microbiana a bajo nivel. Este comportamiento puede atribuirse a la capacidad de la zeolita para retener calor y amortiguar fluctuaciones del medio, como lo evidencian trabajos recientes sobre compostaje de residuos con enmiendas minerales (Waqas et al., 2019).

Todos los tratamientos alcanzaron condiciones de sanitización adecuadas al mantener temperaturas superiores a 55 °C por más de tres días consecutivos, lo que garantiza la reducción de patógenos y semillas viables, tal como se ha reportado en literatura especializada sobre compostaje (Cáceres et al., 2016; Khatibi y Hassani, 2021). No obstante, el tratamiento **TZS** no solo cumplió con este criterio, sino que además presentó un perfil térmico más prolongado y estable, lo que refuerza su potencial para mejorar la eficiencia, la higienización y la estabilidad del proceso compostador.

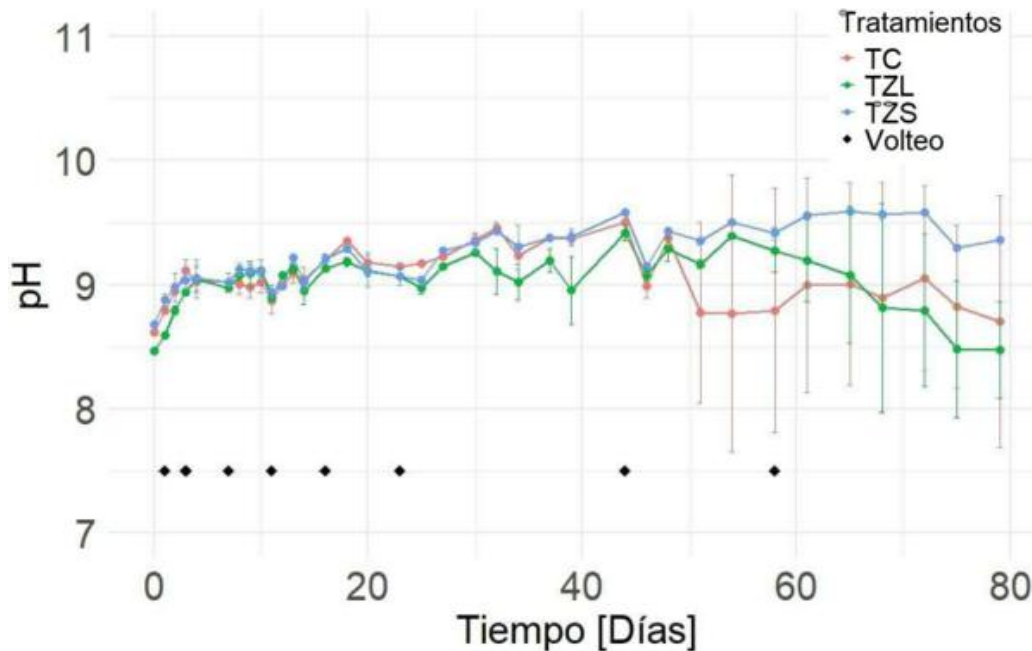
4.2 pH

La Figura 3 muestra la evolución del pH durante los 79 días del proceso de compostaje en los tres tratamientos evaluados: control (TC), con zeolita sólida (**TZS**) y con zeolita en solución (**TZL**). En la etapa inicial (días 0 a 7), todos los tratamientos presentaron un aumento progresivo del pH, alcanzando valores cercanos a 9.0, lo cual es característico de la degradación de

compuestos nitrogenados y la liberación de amoníaco (NH_3) en las primeras fases del compostaje (Ratnawati y Sugito, 2020).

Figura 3

Perfil de pH en el proceso de compostaje.



La evolución del pH durante el compostaje mostró diferencias notables entre los tratamientos evaluados (TC, TZS y TZL). Inicialmente, todos los tratamientos experimentaron un aumento progresivo del pH durante las primeras dos semanas, alcanzando valores entre 8.8 y 9.2. Este incremento temprano es consistente con la degradación de compuestos nitrogenados y la liberación de amoníaco (NH_3), lo cual es característico de las fases mesofílica y termofílica del proceso (Oviedo Ocaña et al., 2022).

A partir del día 15, se observaron divergencias claras en la dinámica del pH. El tratamiento TZS (zeolita sólida) logró mantener los valores de pH más estables y elevados durante gran parte del proceso, alcanzando un pico cercano a 9.6 hacia los días 50-60. Esta tendencia puede estar

asociada con la capacidad de la zeolita sólida para regular el pH al adsorber amoníaco y retener cationes, contribuyendo a un entorno favorable para la actividad microbiana (Liu y Lo, 2001). Sin embargo, hacia el final del proceso (día 80), TZS mostró una ligera disminución del pH, acercándose a valores de 9.0, aunque manteniendo una mayor estabilidad que los otros tratamientos.

Por su parte, el tratamiento TZL (zeolita líquida) evidenció un comportamiento más variable, con oscilaciones del pH a lo largo del proceso y una disminución más marcada hacia el final (valores cercanos a 8.5). Este comportamiento puede explicarse por una menor capacidad estructurante y amortiguadora de la zeolita líquida, lo cual limita su efecto sobre la estabilidad del pH y la actividad microbiana (Yang et al., 2023). Además, el TZL mostró una mayor dispersión de los valores (mayores errores estándar), indicando una menor consistencia del sistema.

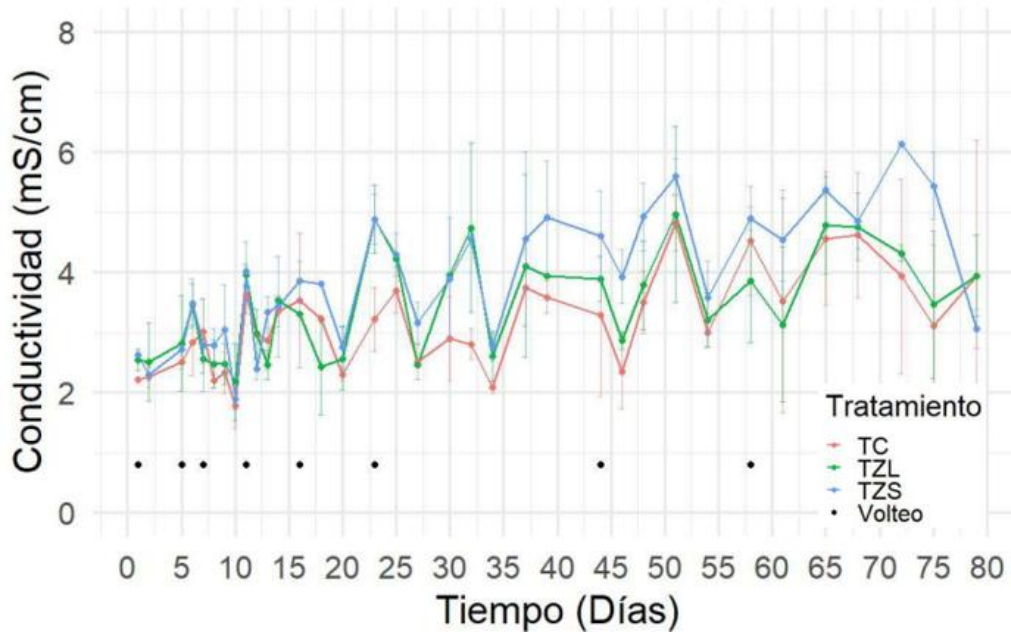
El tratamiento control (TC) presentó el pH más bajo al finalizar el proceso (~8.3), con una marcada tendencia descendente a partir del día 50. Esta caída puede atribuirse a la acumulación de ácidos orgánicos y a una menor capacidad del sistema para amortiguar las variaciones químicas y biológicas, lo que compromete la estabilidad y madurez del compost (Oviedo Ocaña et al., 2022).

4.2.1 Conductividad eléctrica

La Figura 4 muestra la evolución de la conductividad eléctrica (**CE**) durante los 79 días de compostaje para los tratamientos control (**TC**), con zeolita sólida (**TZS**) y con zeolita líquida (**TZL**). Este parámetro refleja la concentración de sales solubles como **amonio** (NH_4^+), fosfatos y nitratos que afectan directamente la calidad agronómica del compost.

Figura 4

Perfil de conductividad eléctrica en el proceso de compostaje.



Durante los primeros 10 días, los tres tratamientos (TC, TZS y TZL) mostraron un rápido descenso en los valores de conductividad eléctrica (CE), partiendo de niveles iniciales superiores a 5 mS/cm y llegando a valores cercanos a 2.5 mS/cm. Este comportamiento puede atribuirse a la absorción inicial de sales por parte de los microorganismos y a la dilución causada por el contenido de humedad en el sistema, en línea con lo reportado por Wang et al. (2003) y Latifah et al. (2015), quienes señalaron que la presencia de zeolita favorece la adsorción de iones y estabiliza la mineralización. En esta fase inicial, tanto TZS como TZL presentaron una disminución más controlada que el control (TC), lo que sugiere una mejor regulación de la liberación de nutrientes gracias a las propiedades de la zeolita.

Entre los días 10 y 50, se observaron oscilaciones en todos los tratamientos, asociadas a los volteos realizados y a la liberación de sales atrapadas en la matriz orgánica. El tratamiento TZS mostró una oscilación más atenuada, con picos máximos alrededor de 5.4 mS/cm, mientras que el

tratamiento control (TC) alcanzó valores más elevados (~6.5 mS/cm), lo cual podría estar relacionado con una menor capacidad de adsorción de sales. Por su parte, el tratamiento TZL, aunque mostró un pico alto hacia el final de esta fase, mantuvo en general una variabilidad menor, posiblemente debido a una liberación más gradual de nutrientes, atribuible a la granulometría más fina de la zeolita líquida y su capacidad de intercambio catiónico superior (Javaid et al., 2024).

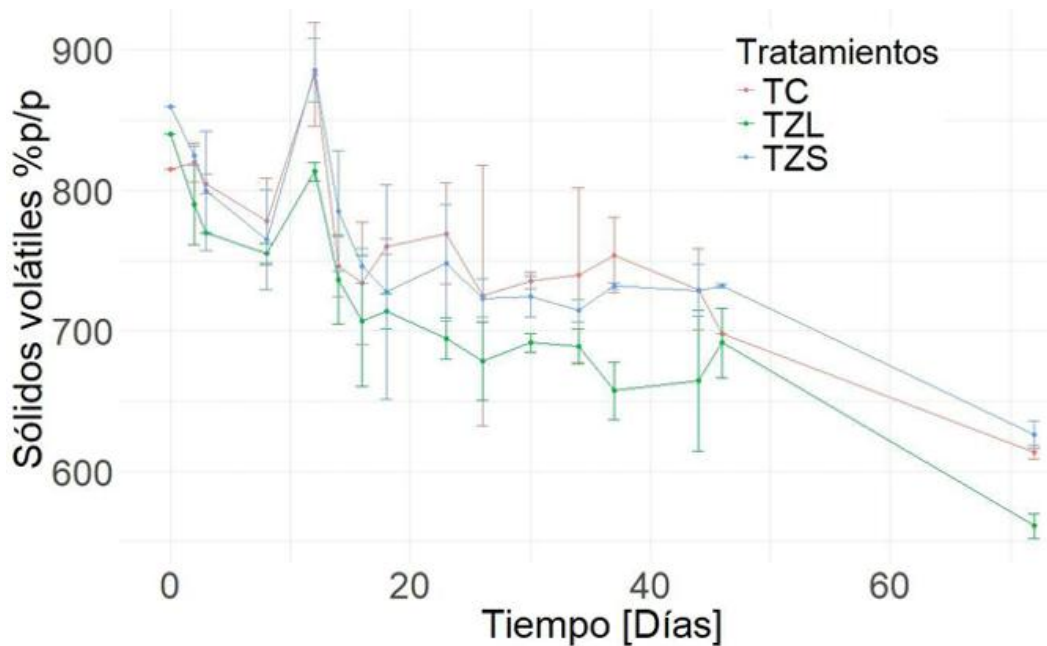
Hacia el final del proceso (días 50–79), los tratamientos TZS y TZL tendieron a estabilizar sus valores de CE entre 5.0 y 5.3 mS/cm, mientras que el control (TC) mostró niveles consistentemente más altos, lo que podría conllevar riesgos fitotóxicos si se aplicara directamente a suelos agrícolas. Estos resultados se alinean con las recomendaciones de Riffaldi et al. (1986), quienes establecieron que para compost maduro, la CE no debe superar valores entre 4–5 mS/cm, lo que sugiere que la zeolita, especialmente en su forma sólida, contribuyó a obtener un compost más estable y potencialmente más seguro para su uso.

4.2.2 Sólidos volátiles

La evolución del porcentaje de sólidos volátiles (**SV**) evidencia la eficiencia del proceso de compostaje en términos de degradación de la materia orgánica. En la gráfica, el tratamiento con zeolita sólida (**TZS**) muestra la mayor reducción acumulada de **SV**, alcanzando valores finales cercanos a 600 g/kg, frente a ~620 g/kg para **TZL** y ~640 g/kg para el tratamiento control (**TC**). Estas cifras indican que **TZS** favoreció un proceso de descomposición más eficiente y acelerado. Durante la fase inicial (Días 0–12), todos los tratamientos iniciaron con valores superiores a 820 g/kg, típicos de residuos frescos con alta carga orgánica. En la Figura 5 se presentan los perfiles de sólidos volátiles para cada tratamiento.

Figura 5

Perfil de sólidos volátiles del compostaje.



La evolución del porcentaje de sólidos volátiles (SV) refleja la eficiencia del compostaje en la degradación de la materia orgánica. En la gráfica, el tratamiento con zeolita sólida (TZS) alcanzó la mayor reducción acumulada de SV, descendiendo hasta valores promedio cercanos a 620 g/kg, seguido por TZL (~660 g/kg) y TC (~700 g/kg). Este comportamiento indica que TZS promovió una degradación más eficiente, favorecida por su capacidad de mejorar la aireación y retención de nutrientes, como se ha reportado en estudios previos (Waqas et al., 2019; Wang et al., 2003).

Durante la fase inicial (días 0–12), todos los tratamientos partieron de valores superiores a 820 g/kg, típicos de residuos frescos con alta carga orgánica. En la fase termofílica (días 14–46), TZS mostró una disminución más rápida y sostenida, alcanzando valores inferiores a 670 g/kg, mientras que TZL se estabilizó cerca de 700 g/kg y TC descendió de forma más gradual. Esto

concuera con lo reportado por Mi et al. (2025), quienes documentaron que la zeolita sólida favorece la mineralización al adsorber amonio y mejorar la estructura del sustrato.

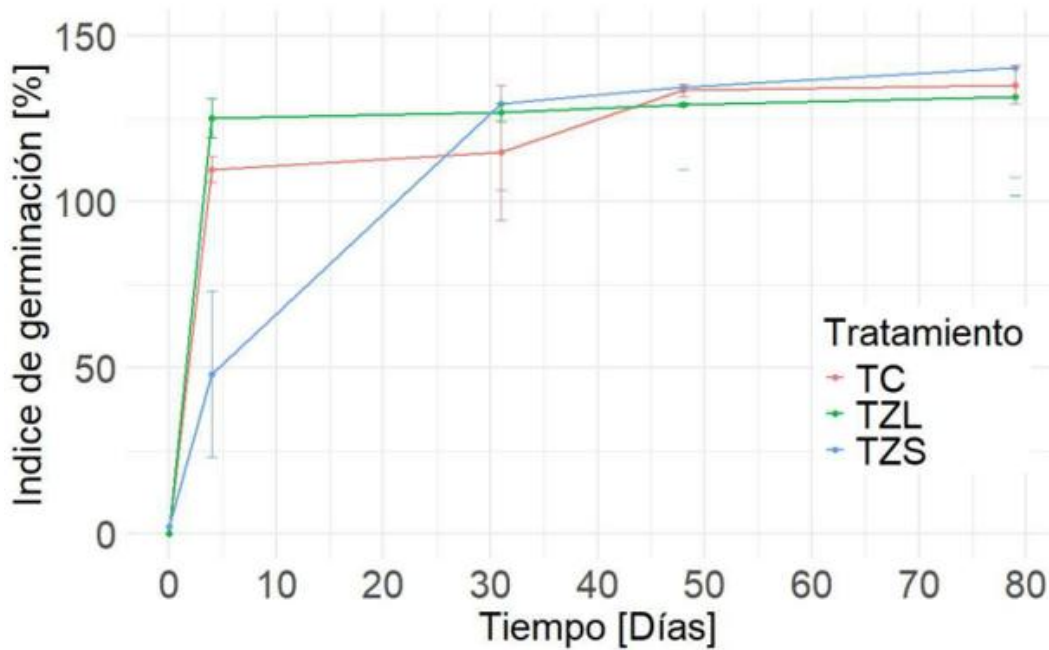
En el final del proceso (día 72), TZS logró una reducción de SV del 24–25% respecto al valor inicial, acercándose a los umbrales de compost maduro recomendados. TZL también mostró una reducción moderada (19–20%), mientras que el control presentó la menor degradación (15–16%). Estos resultados reafirman que la zeolita sólida mejora la eficiencia del compostaje y la calidad final del compost, ya que reduce las pérdidas de nitrógeno y mejora la retención de nutrientes esenciales (Latifah et al., 2015).

4.3 Índice de Germinación (IG)

En la figura 6 se puede observar la evolución del **IG** durante el proceso de compostaje, donde se evidencian variaciones importantes en la fitotoxicidad y madurez de los tratamientos evaluados. En la primera medición (realizada después de los primeros días de compostaje), todos los tratamientos presentaron un **IG** por encima del 100 %, con el tratamiento control (**TC**) alcanzando el valor más alto (176 %), seguido por **TZL** (138 %) y **TZS** (104 %). Estos resultados iniciales sugieren una baja presencia de compuestos fitotóxicos desde las primeras etapas, posiblemente por una rápida reducción de metabolitos inhibidores como los ácidos orgánicos o el amonio, especialmente en el tratamiento control (Oviedo Ocaña et al., 2022).

Figura 6

Perfil de índice de germinación del compostaje.



Hacia el día 31, se observa un comportamiento estable en todos los tratamientos, con IG por encima del 120 %, lo cual refleja una reducción progresiva de la fitotoxicidad y un aumento en la calidad del compost. El tratamiento con zeolita en solución acuosa (**TZL**) mantuvo valores cercanos a 150 %, mientras que **TZS** y **TC** se situaron alrededor de 140 %. Esta diferencia puede atribuirse a la capacidad del **TZL** para mantener condiciones estables de humedad y pH, favoreciendo la disminución de compuestos inhibidores como sales solubles y amoníaco, como lo reportaron Latifah et al. (2015) en compostajes con aditivos absorbentes.

Finalmente, en el día 75, todos los tratamientos presentaron valores muy similares de **IG**, con **TZS** y **TZL** superando ligeramente al **TC**. Este resultado evidencia que, a largo plazo, la aplicación de zeolita, especialmente en solución, no solo estabiliza el compost, sino que también mejora la calidad biológica, reduciendo la fitotoxicidad residual. Este comportamiento se alinea

con los hallazgos de Wang et al. (2003), quienes observaron que la zeolita actúa como agente estabilizante, favoreciendo la maduración del compost y la disminución de compuestos fitotóxicos.

En síntesis, todos los tratamientos lograron valores finales de **IG** superiores al 80 %, umbral mínimo para considerar un compost como maduro y apto para uso agrícola según la norma chilena NCh 2880 (Rodríguez, 2015). No obstante, el **TZS** y el **TZL** destacan por su consistencia y mejores resultados en términos de calidad del compost final, reforzando su potencial como enmiendas efectivas.

4.4 Contenido de nutrientes

En la figura 7 se observa que, durante el proceso de compostaje, se evidenció una disminución progresiva del COT en los tres tratamientos (**TC**, **TZS** y **TZL**), como resultado de la actividad microbiana que transforma la materia orgánica en CO₂. (Dume et al., 2021). En la fase mesofílica, los valores oscilaron entre 34 % y 36 %, indicando una composición inicial rica en carbono. En la fase termofílica, esta disminución fue más marcada, especialmente en **TZS**, posiblemente por una mayor eficiencia aeróbica debido a la aireación mejorada que proporciona la zeolita sólida (Haroon et al., 2018).

Figura 7

Porcentaje de carbono orgánico total en cada etapa del compostaje



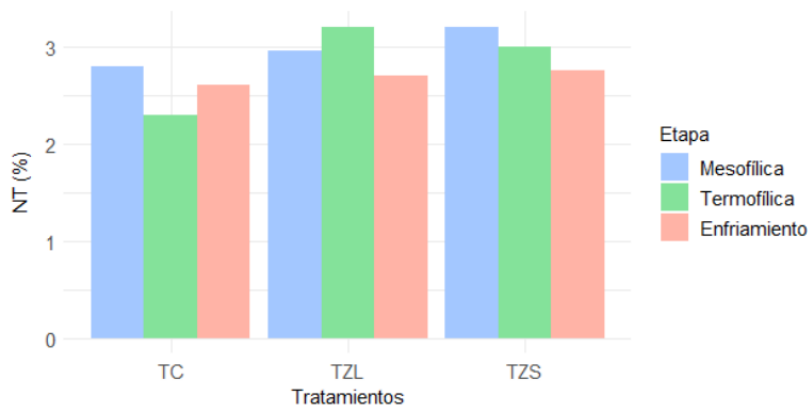
Al finalizar el proceso, los valores se estabilizaron, con **TZL** mostrando el mayor COT residual. Esto puede deberse a la presencia de materiales menos degradables en este tratamiento, lo cual ralentiza la mineralización del carbono (Paredes et al., 2000).

En la fase mesofílica, TZS presentó el valor más alto de NT (~3.2 %), seguido por TZL (~2.8 %) y TC (~2.6 %), evidenciando la capacidad de la zeolita sólida para retener nitrógeno amoniacal [37]. Durante la fase termofílica, se observaron pérdidas en TC debido a volatilización de NH₃ por aumento de temperatura y pH, mientras que TZS y TZL lograron una mejor conservación del nutriente (Bernal et al., 2009).

En la etapa de enfriamiento, los valores convergieron (~2.6 %), con menores pérdidas en tratamientos con zeolita. Este comportamiento sugiere que tanto la forma sólida como líquida favorecen la retención de nitrógeno frente a la pérdida gaseosa, optimizando la calidad fertilizante del compost (Oviedo Ocaña et al., 2022; Bernal et al., 2009). Todo este análisis se puede apreciar a continuación en la figura 8

Figura 8

Porcentaje de nitrógeno total de cada tratamiento en las etapas del compostaje.



4.5 Análisis del efecto de los co-sustratos en la calidad del producto final del co-compostaje

La Tabla 3 muestra los resultados de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados al finalizar el proceso de compostaje para los tratamientos control. (TC), con zeolita sólida (TZS) y con zeolita en solución (TZL), contrastados con los criterios mínimos establecidos por la norma NTC 5167 (ICONTEC, 2022).

Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos.

PARAMETROS	TC	TZS	TZL	NTC5167
Humedad (%)	46±9.9	43.5±6.36	35.5±7.78	<35
Cenizas (%)	27.3±0	30.7±1.414	28.9±3.96	<60
COT (%)	32.05±0.35	32.5±3.535	34.45±1.77	>15
pH	8.705±1.01	8.475±0.39	9.365±0.021	>4-<9
Conductividad (mS/cm)	3.93±2.26	3.46±1.23	5.435±0.56	-
NT (%)	2.24±0.21	2.44±0.08	2.1±0.184	>1
C/N	14.36±1.2	13.3±0.99	16.5±2.29	-
PT(%)	4.555±0.25	3.93±0.58	3.755±0.68	>1
CT (NMP/g)	<3	<3	<3	Cumple
CF (NMP/g)	<3	<3	<3	Cumple
Salmonella /25g	Ausente	Ausente	Ausente	Cumple

Humedad. Solo el tratamiento con zeolita líquida (TZL) cumplió con el límite inferior establecido por la norma (<35 %), mientras que TC y TZS superaron ligeramente este umbral. Aunque valores elevados de humedad pueden afectar la conservación y comercialización del compost, en este caso no representan un riesgo sanitario o agronómico inmediato, pero sí sugieren la necesidad de un periodo adicional de secado post-proceso (Oviedo Ocaña et al., 2022).

Cenizas. Todos los tratamientos estuvieron por debajo del 60 %, valor máximo establecido por la norma. El tratamiento TZS presentó el valor más alto (30.7 %), lo que podría estar relacionado con una mayor mineralización de la materia orgánica durante el proceso. Este parámetro, además de reflejar la presencia de componentes inorgánicos, sirve como indicador indirecto de la eficiencia de descomposición (Sharafi et al., 2024).

Carbono orgánico total (COT). Los tres tratamientos superaron ampliamente el umbral mínimo del 15 %, lo cual indica una adecuada presencia de materia orgánica estabilizada. Destaca el tratamiento con zeolita líquida (TZL) con el mayor valor (34.45 %), lo que podría atribuirse a una menor tasa de mineralización de carbono, probablemente por condiciones de menor aireación o retención térmica, como también lo sugiere Hwang et al. (2020) en compostajes con enmiendas ricas en nutrientes.

pH. El tratamiento TZS fue el que mostró el menor valor de pH final, situándose alrededor de 8.5, mientras que TZL y TC alcanzaron valores más alcalinos, incluso por encima del rango establecido por la NTC 5167 (4–9). Este comportamiento podría atribuirse a la adsorción de compuestos ácidos por parte de la zeolita sólida en TZS, así como a una mayor acumulación de amoníaco no volatilizado en TZL, que contribuyó a elevar el pH. Estos resultados coinciden con lo observado en compostajes con enmiendas minerales básicas como la clinoptilolita (Wang et al., 2003).

Conductividad eléctrica (CE). Si bien la norma NTC 5167 no establece un límite específico, se ha sugerido que valores superiores a 5 mS/cm pueden afectar cultivos sensibles (Gaind y Nain, 2010). En este sentido, el tratamiento TZL superó dicho umbral (5.43 mS/cm), lo que podría limitar su aplicación directa en campo abierto. TC y TZS mostraron valores más moderados, compatibles con aplicaciones agrícolas seguras (Oviedo Ocaña et al., 2017).

Nitrógeno total (NT). Todos los tratamientos superaron el valor mínimo requerido (>1 %), siendo TZS el que registró el contenido más alto (2.44 %), lo que sugiere una mejor conservación de nutrientes nitrogenados, probablemente por la capacidad de la zeolita sólida para adsorber amonio y evitar su pérdida por volatilización (Ahmad et al., 2024).

Relación C/N. Todos los tratamientos presentaron una relación C/N inferior a 20, indicativa de compost maduro. El valor más bajo se presentó en TZS (13.3), lo que refuerza la hipótesis de que la zeolita sólida favoreció una descomposición más eficiente de la materia orgánica y una menor pérdida de nitrógeno, como también lo destaca Bernal et al. (2009) en compostajes con residuos nitrogenados.

Fósforo total (PT). Finalmente, todos los tratamientos superaron ampliamente el mínimo requerido (>1 %). El tratamiento control obtuvo el valor más alto (4.55 %), mientras que TZL presentó el más bajo (3.75 %). La presencia de roca fosfórica y su interacción con la zeolita pudo influir en la disponibilidad final de fósforo, como ha sido reportado por Nuñez Villareal y Soca Nuñez et al. (2015) y respaldado por los hallazgos de Xu et al. (Xu et al., 2025) respecto al papel sinérgico de enmiendas minerales. Con respecto al análisis microbiológico realizado por la Universidad de Antioquia (UDEA), no se detectan agentes patógenos en el producto final. Los resultados fueron menores a 3, indicando que no se detectaron coliformes en la muestra.

5. Conclusiones

- La zeolita sólida (TZS) fue el tratamiento más eficaz, destacándose por su capacidad para mejorar la degradación de la materia orgánica durante el proceso de compostaje. Logró valores de reducción de sólidos volátiles superiores al 29%, frente a los aproximadamente 27% observados en el tratamiento con zeolita en solución acuosa (TZL) y cerca del 24% en el tratamiento control (TC). Esto refleja una mayor eficiencia en comparación con los otros tratamientos confirmando su potencial para mejorar la calidad final del compost y el proceso de estabilización.
- El tratamiento con zeolita sólida (TZS) evidenció un contenido final de nitrógeno total (2,44 %) superior a los otros tratamientos, lo que indica una mayor retención de nutrientes en el compost final. Aunque no se midieron directamente las formas nitrogenadas como amonio o nitratos, este resultado sugiere que la adición de zeolita sólida pudo contribuir a la reducción de pérdidas por volatilización de nitrógeno, mejorando así la calidad y estabilidad del compost.
- El tratamiento con zeolita en solución acuosa (TZL) mostró el valor final de pH más alto (9,36), superando el rango recomendado por la NTC 5167 ($>4-<9$), lo que podría afectar negativamente la aplicabilidad del compost en algunos suelos. A pesar de haber presentado inicialmente ventajas en cuanto al IG, especialmente en la fase intermedia, estos beneficios fueron opacados por su comportamiento final menos favorable en comparación con TZS, destacando la importancia de evaluar integralmente los efectos de cada tratamiento

6. Recomendaciones

- Priorizar la zeolita sólida como material de enmienda y adsorbente en compostajes con residuos nitrogenados, dadas sus ventajas en términos de eficiencia térmica, estabilización química y retención de nutrientes, sin generar efectos fitotóxicos.
- Realizar estudios adicionales con otras granulometrías de zeolita, y en combinación con biocarbón u otras enmiendas minerales para evaluar efectos sinérgicos que optimicen la calidad del compost.
- Ampliar el monitoreo de parámetros críticos como el contenido de amonio, nitrato y carbono soluble, para obtener una caracterización más completa del comportamiento químico durante el proceso y correlacionar estos con la dinámica microbiana y la madurez del compost.
- Validar en campo el uso del compost generado, mediante ensayos de aplicación agrícola en cultivos locales, para confirmar su efecto en la disponibilidad de nutrientes del suelo, su capacidad de retención hídrica y su influencia en el desarrollo vegetal.
- Si bien este estudio se desarrolló en condiciones controladas y no directamente sobre suelos del páramo de Berlín, los resultados obtenidos permiten evidenciar el potencial de la zeolita como aditivo para mejorar la calidad del compost generado a partir de estiércol de pollo y residuos de cebolla. Se recomienda realizar investigaciones futuras que evalúen su aplicabilidad en contextos específicos de alta montaña y sus posibles efectos sobre suelos sensibles.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo-Tarazona, Á. (25 de Junio de 2020). *Bucaramanga, entre la sobreexplotación minera o la preservación del agua en el páramo de Santurbán*. *Entramado*: 16(2 SE-Artículos), 112-124. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.6547>
- Ahmad, A., Ijaz, S. S., Khan, K. S., & Ansar, M. (2024). *Potential of Zeolite-Based Urea Formulations as Slow-Release Nitrogen Fertilizer*. *Pakjas*: doi.org/10.21162/PAKJAS/24.200
- Álvarez Ayuso, E., García Sánchez, A., & Querol, X. (Diciembre de 2003). *Purification of metal electroplating waste waters using zeolites*. *Water Research*: 37(20), 4855-4862. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.08.009>
- Amner, W., McCarthy, A. J., & Edwards, C. (1 de Diciembre de 1988). *Quantitative Assessment of Factors*. *Applied and Environmental Microbiology*: 54(12), 3107-3112. <https://doi.org/10.1128/aem.54.12.3107-3112.1988>
- Barrera, J. F., & Núñez, M. S. (2022). *Revista Incaing issn 2448 913*. ISSN.
- Beffa, T., Blanc, M., & Aragno, M. (Enero de 1996). *Obligately and facultatively autotrophic, sulfur- and hydrogen-oxidizing thermophilic bacteria isolated from hot composts*. *Springer*: 165(1), 34-40. <https://doi.org/10.1007/s002030050293>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (Noviembre de 2009). *Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review*. *Bioresource Technology*: 100 (22), 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Cáceres, R., Coromina, N., Malinska, K., Martínez Farré, F. X., López, M., Soliva, M., & Márfa, O. (Diciembre de 2016). *Nitrification during extended co-composting of extreme mixtures*

- of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media. Waste Management: 241, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.014>*
- Campitelli, P., Ceppi, S., Velasco, M., & Rubenacker, A. (2014). *Compostaje: Obtención de abonos de calidad para las plantas*. 1º Edición. Editorial Brujas.
- Chan, M. T., Selvam, A., & Wong, J. W. (Enero de 2016). *Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment. Bioresource Technology. Bioresource Technology: 200, 838-844. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.093>*
- Díaz Vergara, M., Montes Castillo, K., & Urriola, L. (2021). *Evaluation of the phytotoxicity of commercial organic fertilizers using seeds of lettuce (Lactuca sativa L.) and cucumber (Cucumis sativus). SIDALC: 1(23). https://revistas.up.ac.pa/index.php/semilla_este/article/view/2118*
- Doni, S., Masciandaro, G., Macci, C., Manzi, D., Mattii, G. B., Cataldo, E., . . . Peruzzi, E. (2 de Febrero de 2024). *Zeolite and Winery Waste as Innovative By-Product for Vineyard Soil Management. Environments: 11 (2), 29. <https://doi.org/10.3390/environments11020029>*
- Dume, B., Hanc, A., Svehla, P., Michal, P., Chane, A. D., & Nigussie, A. (22 de Octubre de 2021). *Carbon Dioxide and Methane Emissions during the Composting and Vermicomposting of Sewage Sludge under the Effect of Different Proportions of Straw Pellets. Atmosphere:12(11), 1380. <https://doi.org/10.3390/atmos12111380>*
- Eric Brinton, W. F., Evans, M. L., Droffner, R. B., & Brinton, W. (Enero de 1995). *A standardized dewar test for evaluation of compost self-heating. ResearchGate.*
- Gaind, S., & Nain, L. (Mayo de 2010). *Exploration of composted cereal waste and poultry manure for soil restoration. Bioresource Technology: 12(11), 1380 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.016>*

- Haroon, B., Abbasi, A. M., Faridullah, Un, P., Pervez, A., & Irshad, M. (18 de Noviembre de 2018). *Chemical Characterization of Cow Manure and Poultry Manure after Composting with Privet and Cypress Residues*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*: 49(22), 587-866. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1546873>
- Haug, R. T. (3 de Mayo de 2018). *The Practical Handbook of Compost Engineering*, 1.a ed. Routledge: <https://doi.org/10.1201/9780203736234>
- Hwang, H. Y., Kim, S. H., Kim, M. S., Jin, P. S., & Lee, C. H. (08 de Enero de 2020). *Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality*. *Applied Biological Chemistry*: 63(1), 3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13765-019-0483-8>
- ICONTEC. (18 de Mayo de 2022). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Icontec: <https://tienda.icontec.org/>
- Insam, H., Klammsteiner, T., & Gómez Brandon, M. (2023). *Biology of compost*. M.J Goss & M. B. T.-E. of S. in the E. (Second E. Oliver). Academic Press: 522-532 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00178-6>
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (7 de Noviembre de 2003). *Compost - Clasificación y requisitos*. SAG: <https://www.sag.cl/>
- Javaid, A., Munir, N., Abideen, Z., Siddiqui, Z. S., & Hong Yong, J. W. (Diciembre de 2024). *The role of natural and synthetic zeolites as soil amendments for mitigating the negative impacts of abiotic stresses to improve agricultural resilience*. *Plant Stress*: 14, p.100627 <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100627>

- Khatibi, H., & Hassani, A. (7 de Abril de 2021). *Effective management and composting of organic wastes using new developed consortia*. Springer: 23(11), 16891-16910. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01383-3>
- Komilis, D. P., & Tziouvaras, S. (Mayo de 2009). *A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts*. Waste Management: 29(5), 1504-1513. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.016>
- Latifah, O., Ahmed, O. H., & Majid, N. M. (27 de Marzo de 2015). *Compost maturity and nitrogen availability by co-composting of paddy husk and chicken manure amended with clinoptilolite zeolite*. Waste Manage Res: 33(4), 322-331. <https://doi.org/10.1177/0734242X15576771>
- Liu, C. H., & Lo, K. V. (4 de Abril de 2001). *Ammonia removal from compost leachate using zeolite. II. A study using continuous flow packed columns*. Journal of Environmental Science and Health, Part B: 36(5), 667-675. <https://doi.org/10.1081/PFC-100106193>
- Liu, C. H., & Lo, K. V. (23 de Marzo de 2001). *Ammonia removal from composting leachate using zeolite. I. Characterization of the zeolite*. Journal of Environmental Science and Health, Part A: 36(9), 1671-1688 <https://doi.org/10.1081/ESE-100106251>
- Madrini, B., Shibusawa, S., Kojima, Y., & Hosaka, S. (2016). *Effect of natural zeolite (clinoptilolite) on ammonia emissions of leftover food-rice hulls composting at the initial stage of the thermophilic process*. J. Agric. Meteorol: 72(1), 12-19. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-15-00012>
- Manu, M. K., Wang, C., Li, D., Varjani, S., & Wong, J. W. (15 de Octubre de 2022). *Impact of zeolite amendment on composting of food waste digestate*. Journal of Cleaner Production: 371, p. 133408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133408>

- Meena, A. L., Karwal, M., Dutta , D., & Mishra, R. (Enero de 2021). *Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting*. Journal of Cleaner Production: Vol371, p. 133408. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13546.95689>
- Mi, J., Hou, L., Hou, Y., Song, C., Pan, L., & Wei, Z. (1 de Febrero de 2025). *Enhancing compost quality: Biochar and zeolite's role in nitrogen transformation and retention*. Science of The Total Environment: Vol 963, p. 178490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178490>
- Noori, M., Zendehtel, M., & Ahmadi, A. (30 de Agosto de 2005). *Using natural zeolite for the improvement of soil salinity and crop yield*. Toxicological & Environmental Chemistry: Vol 88 N° 1, 77-84. <https://doi.org/10.1080/02772240500457928>
- Núñez Villareal, J., & Soca Núñez, M. (2015). *Influencia de zeolita y roca fosfórica sobre el desarrollo de los cultivos de sorgo y papa*. Ciencia Agropecuaria: <http://revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/122>
- Oviedo Ocaña, E. R., Domínguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (17 de Agosto de 2017). *Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality*. Waste Biomass Valor: Vol 10 N°1, 63-74. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0047-2>
- Oviedo Ocaña, E. R., Hernández Gómez, A., Domínguez, I., Parra Orobio, B. A., Soto Paz, J., & Sánchez, A. (16 de Julio de 2022). *Evaluación del co-compostaje como alternativa para el aprovechamiento de residuos agrícolas de cebolletas, estiércol de pollo y biorresiduos producidos en ecosistemas de páramos*. Sustainability: 14(14), 8720. <https://doi.org/10.3390/su14148720>
- Oviedo Ocaña, E. R., Marmolejo Rebellon, L. F., & Torres Lozada, P. (Marzo de 2017). *Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en*

desarrollo. Lecciones desde Colombia. Ingeniería, Investigación y Tecnología:
<http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n1.003>

Oviedo Ocaña, E. R., Soto Paz, J., Sánchez Torres, V., Castellanos Suárez, L., & Komilis, D. (Junio de 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), p. 107816. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107816>

Özcan, H., Kavdir, Y., Evren Erginal, A., Ekinci, K., Kumbul, S., Ekinci, E., . . . Kaya, I. (2021). *Composting hand book for young farmers and all users.* Composterasmus: www.composterasmus.org

Paredes, C., Roig, A., Bernal, M. P., Sánchez Monedero, M. A., & Cegarra, J. (Noviembre de 2000). *Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes.* Biology and Fertility of Soils: 32(3), 222-227. <https://doi.org/10.1007/s003740000239>

Paterlini, H., Gonzáles, M. V., & Picone, L. I. (2017). *Quality of fresh and composted broiler litter.* CABI.

Ratnawati, R., & Sugito, S. (Abril de 2020). *REDUCTION OF AMMONIA EMISSIONS FROM THE COMPOSTING OF SLAUGHTERHOUSE SOLID WASTE USING ZEOLITE.* Indones. J. Urban. Environ. Technol: 164-176. <http://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v3i2.5795>

Rawoteea, S. A., Mudhoo, A., & Kumar, S. (Marzo de 2017). *Co-composting of vegetable wastes and carton: Effect of carton composition and parameter variations.* Bioresource Technology: 227, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.019>

- Reyes Torres, M., Oviedo Ocaña, E. R., Domínguez, I., Komilis, D., & Sánchez, A. (Julio de 2018). *A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies*. *Waste Management*: 77, 486-499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>
- Riffaldi, R., Levi Minzi, R., Pera, A., & de Bertoldi, M. (Diciembre de 1986). *Evaluation of Compost Maturity By Means of Chemical and Microbial Analyses*. *Waste Management*: 4(1), 387-396. <https://doi.org/10.1177/0734242X8600400157>
- Rodríguez, I. (Diciembre de 2015). *Aprovechamiento sostenible de los residuos de origen orgánico y la zeolita en la agricultura*. ResearchGate.
- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Vaes, K., Klammer, S., De Clercq, D., Coosemans, J., . . . Columpios, J. (Enero de 2003). A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of Microbiology*(53(4)), 349-410.
- Schild, A., & Sharma, E. (1 de Agosto de 2011). *Sustainable Mountain Development Revisited. Mountain Research and Development*. *Mountain Research and Development*: 31(3), 237-241. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00069.1>
- Sharafi, R., Jouzani, G. S., Kirimi, E., Ghanavati, H., & Kowsari, M. (17 de Abril de 2024). *Integrating bioprocess and metagenomics studies to enhance humic acid production from rice straw*. *Springer*: 40(173), Jun 2024). <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03959-3>
- Soto Paz, J., Oviedo Ocaña, E. R., Angarita Rangel, M. A., Rodríguez Flórez, L., Castellanos Suárez, L. J., Nabarlatz, D., & Sánchez Torres, V. (Septiembre de 2022). *Optimization of lignocellulolytic bacterial inoculum and substrate mix for lignocellulose degradation and product quality on co-composting of green waste with food waste*. *Bioresource Technology*: 359, p. 127452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127452>

- Soudejani, H. T., Kazemian, H., Inglezakis, V. J., & Zorpas, A. A. (Noviembre de 2019). *Application of zeolites in organic waste composting: A review. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*: 22, p. 101396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101396>
- Spyridonidis, A., Vasiliadou, I. A., & Stamatelatou, K. (15 de Febrero de 2022). *Effect of Zeolite on the Methane Production from Chicken Manure Leachate*. *Sustainability*: 14(4), p. 2207. <https://doi.org/10.3390/su14042207>
- Varnero, M. T., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). *Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje*. SciELO: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000100003>
- Wang, J., Huang, C. P., & Allen, H. E. (Diciembre de 2003). *Modeling heavy metal uptake by sludge particulates in the presence of dissolved organic matter*. *Water Research*: 37(20), 4835-4842. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.08.021>
- Waqas, M., Nizami, A. S., Aburizaiza, M. A., Barakat, M. A., Asam, Z. Z., Khattak, B., & Rashid, M. I. (1 de Julio de 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>
- Xu, J., Wang, X., Feng, J., Zhang, W., & Sun, J. (1 de Febrero de 2025). *Study of the Relationship Between Nitrogen, Phosphorus Content, and Microbial Community Changes in Deer Manure Compost with Different Conditioners*. *Fermentation*: 11(2), 66, feb 2025. <https://doi.org/10.3390/fermentation11020066>
- Yang, M., Zhang, Y., Wang, X., Wang, Z., Li, P., Shi, X., . . . Wang, H. (18 de Julio de 2023). *An Optimization Design for the Resource Utilization of Grape Branches Based on the*

Orthogonal Test and Gray Relational Analysis Method. Sustainability: 15(14), p. 11211, Jul 2023. <https://doi.org/10.3390/su151411211>

Zhang, L., & Sun, X. (Mayo de 2015). *Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste*. Waste Management: 39, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.037>

Zhang, X.-n., Guo, Q.-p., Shen, X.-x., Yu, S.-w., & Qiu, G.-y. (Noviembre de 2015). *Water quality, agriculture and food safety in China : Current situation, trends, interdependencies, and management*. Journal of Integrative Agriculture. Journal of Integrative Agriculture: 14(11), 2365-2379. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61128-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61128-5)