

Eficacia de bioprocesos microbianos en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos del mercado de Chota (Perú)

Ismael Suárez Medina^{1*}, Uber Luis Huamán Livaque¹,
Brendy Anai Uria Celi², Héctor Orlando Chávez Angulo³,
Olegario Heiner Cabrera Cabrera¹

Effectiveness of microbial bioprocesses in the treatment of organic solid waste from the Chota market, Peru

- 1 Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Chota. Cajamarca, Perú.
- 2 Departamento de Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Económicas y Ambientales, Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Frontera. Piura, Perú.
- 3 Departamento de Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Chota. Cajamarca, Perú.



Citar como: Suarez Medina, I. et al. (2026). «Eficacia de bioprocesos microbianos en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos del mercado de Chota (Perú)». *South Sustainability*, 7(2), e154.

DOI: 10.21142/SS-0702-2026-e154

Recibido: 13/5/2026
Revisado por pares
Aceptado: 23/6/2026



© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
issuarezmedina1975@gmail.com

Editor asociado:
John Flores-Alvarez

RESUMEN

La implementación de bioprocesos microbianos representa una alternativa biotecnológica clave para optimizar la gestión de la biomasa residual en entornos urbanos, lo que acelera la estabilización de la materia orgánica y mejora la calidad del producto final. Bajo esta premisa, la presente investigación evaluó el efecto de inóculos bacterianos en la cinética de degradación de residuos orgánicos procedentes del mercado mayorista de Chota, Cajamarca. Mediante un diseño experimental completamente al azar (DCA), se contrastaron tres condiciones: un grupo control (0 % inóculo) y dos tratamientos con concentraciones diferenciadas de consorcios microbianos (5 % y 10 %), ejecutados por triplicado. Los resultados demuestran que la adición de microorganismos optimizó significativamente el proceso de biotransformación. El tratamiento con mayor densidad de inóculo (10 %) exhibió la máxima eficiencia productiva, al alcanzar un rendimiento de 506,79 kg de compost, superior a los 410,87 kg y 306,93 kg obtenidos en las dosis intermedia y control, respectivamente. Se determinó una correlación positiva entre la carga microbiana aplicada y la tasa de generación de producto final. El perfil analítico evidenció abundante riqueza mineral en micronutrientes (Cu, Mn, Fe, Zn y B); asimismo, aunque los elementos traza (Pb, Cr y Cd) se situaron ligeramente por encima de los límites de la norma NTP 201.207:2020, la dosis al 10 % promovió la mayor atenuación de plomo y cromo. En conclusión, la aplicación de bioprocesos basados en consorcios microbianos constituye una estrategia eficaz para la valorización de residuos sólidos, que garantiza un abono orgánico técnica y nutricionalmente viable para la recuperación de suelos o sistemas agroforestales.

Palabras clave: bioprocesos microbianos, compostaje acelerado, gestión de biomasa comercial, residuos sólidos orgánicos, tratamientos

ABSTRACT

The implementation of microbial bioprocesses constitutes a key biotechnological alternative for the optimizing of residual biomass management in urban environments, accelerating organic matter stabilization and improving final product quality. Building on this premise, the present study evaluated the effect of bacterial inoculants on the degradation kinetics of organic waste from the wholesale market of Chota, Cajamarca. Using a completely randomized design (CRD), three conditions were compared: a control group (0% inoculum); and two treatments with differentiated concentrations of microbial consortia (5% and 10%), conducted in triplicate. The results demonstrate that the addition of microorganisms significantly optimized the biotransformation process. The treatment with the highest inoculum density (10%) exhibited the maximum production efficiency, reaching a compost yield of 506.79 kg, which was superior to the 410.87 kg and 306.93 kg obtained in the intermediate and control doses, respectively. A positive correlation was determined between the applied microbial load and the final product generation rate. The analytical profile evidenced abundant micronutrient mineral richness (Cu, Mn, Fe, Zn and B). Furthermore, although trace elements (Pb, Cr, and Cd) were found to be slightly above the limits of the NTP 201.207:2020 standard, the 10% dose promoted the greatest attenuation of lead and chromium. In conclusion, the application of bioprocesses based on microbial consortia constitutes an effective strategy for solid waste recovery, guaranteeing a technically and nutritionally viable organic fertilizer for soil remediation or agroforestry systems.

Keywords: microbial bioprocesses, accelerated composting, commercial biomass management, solid organic waste, treatments



Introducción

A nivel global, la gestión sostenible de los residuos sólidos orgánicos (RSO) generados en centros de abasto municipales constituye uno de los desafíos ambientales más críticos para el desarrollo urbano contemporáneo (Serna y Serna, 2022; Kaza et al., 2018). Los mercados mayoristas en economías emergentes de América Latina, Asia y África actúan como núcleos de alta concentración demográfica y comercial, donde la fracción orgánica representa entre el 60 % y el 80 % del flujo total de desechos (Soto-Paz et al., 2017; Vargas-Pineda et al., 2019). Se estima que cerca del 90 % de estos residuos biogénicos son incinerados de forma incontrolada o acumulados en vertederos a cielo abierto, lo que desencadena amenazas severas para la salud pública y la estabilidad climática global debido a la degradación anaerobia descontrolada (Viteri y De Jesús, 2023). Este fenómeno genera lixiviados altamente tóxicos que contaminan acuíferos y provoca la emisión masiva de gases de efecto invernadero, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), los cuales exacerban de manera directa el calentamiento global (Khan et al., 2025). Ante este escenario internacional, la transición agroecológica y la implementación de modelos de economía circular basados en la valorización biotecnológica de la biomasa residual en mercados municipales surgen como imperativos globales indispensables (Zainudin et al., 2022).

Esta problemática macroambiental se replica con dinámicas particulares en los ecosistemas de montaña y regiones altoandinas de América del Sur. En el contexto peruano, los reportes actualizados del Ministerio del Ambiente (Minam, 2024) indican que la generación per cápita (GPC) en las zonas urbanas de la sierra norte ha experimentado un incremento sostenido, y se sitúa actualmente en un promedio de 0,612 kg/hab/día. Un claro exponente de esta realidad es la ciudad de Chota, donde el mercado mayorista Julio Vásquez Acuña constituye el principal núcleo generador de RSO de la provincia. Esta intensa actividad comercial aporta una fracción mayoritaria de las más de 25 toneladas diarias de residuos recolectadas en el distrito, las cuales, debido a la falta de infraestructura tecnológica regional, son dispuestas directamente en el botadero de Colpa Huacarís sin ningún tipo de tratamiento previo (Yrigoin et al., 2024). Dicha disposición inadecuada perpetúa la pérdida sistemática de nutrientes a escala local y deteriora la integridad biológica de los suelos de ladera y las fuentes hídricas en las microcuencas (Suárez et al., 2025).

Para mitigar estos impactos, el compostaje se presenta a nivel internacional como una biotecnología de bajo costo, alta eficiencia y amplia adopción para transformar residuos urbanos en enmiendas edáficas estables (Sánchez Tigrero et al., 2026). Sin embargo, la aplicación de procesos de compostaje convencional enfrenta limitaciones biofísicas críticas al ejecutarse en entornos de gran altitud (Huapaya

Cruz, 2024). En estos ecosistemas, las bajas temperaturas ambientales, la drástica oscilación térmica y la menor presión parcial de oxígeno prolongan los tiempos de maduración por encima de los 150 días, lo que dificulta el sostenimiento de las fases termofílicas necesarias para garantizar la correcta higienización y desnaturalización de patógenos en el producto final (Khan et al., 2025).

Para superar estas barreras térmicas y cinéticas, la investigación biotecnológica de vanguardia propone la intervención dirigida del proceso mediante la bioaumentación con consorcios microbianos seleccionados (Carrillo Andrade, 2023). La literatura científica reconoce que la eficiencia del compostaje regulado depende de una sucesión ecológica compleja de comunidades microbianas, lideradas secuencialmente por bacterias de los filos *Proteobacteria*, *Firmicutes* y *Actinobacteria*, en simbiosis metabólica con hongos del tipo *Ascomycota* (Alvarez-Vera et al., 2019). Diversos estudios globales demuestran que la inoculación controlada de estos consorcios exógenos acelera significativamente la mineralización de la materia orgánica y potencia la actividad enzimática celular, lo que reduce los tiempos de procesamiento hasta en un 30 % (Zainudin et al., 2022). No obstante, persiste una brecha de conocimiento crítica en la ciencia del suelo contemporánea, puesto que la gran mayoría de estas investigaciones se han desarrollado bajo condiciones ambientales controladas o en regiones situadas a nivel del mar (Alvarez-Vera et al., 2019). Por ende, existe escasa evidencia científica y empírica respecto a la capacidad de adaptación, resiliencia metabólica y eficiencia de dichos consorcios microbianos en ecosistemas altoandinos de altura, donde las condiciones climáticas extremas condicionan directamente las tasas de respiración y el metabolismo celular (Huamán, 2025).

Desde una perspectiva socioeconómica y agronómica de alcance regional, el aprovechamiento y valorización de los RSO del mercado de Chota representa una estrategia clave para contrarrestar la dependencia histórica hacia los fertilizantes sintéticos importados (Huamán, 2025), cuya volatilidad de precios en el mercado internacional ha vulnerado la seguridad alimentaria de las comunidades campesinas andinas (Parra et al., 2024). La obtención de un compost de alta calidad biológica no solo restaura la fertilidad natural y la estructura físico-química del suelo andino (Alvarez-Vera et al., 2019), sino que incrementa la capacidad de retención hídrica y restituye la reserva de micronutrientes esenciales, al transformar un pasivo ambiental urbano en un insumo biotecnológico estratégico para la sostenibilidad de la agricultura local (Amuah et al., 2025).

Bajo este escenario multifactorial, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficacia de bioprocesos microbianos en el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del mercado mayorista Julio Vásquez Acuña. Se planteó como hipótesis científica

que la aplicación controlada de un consorcio microbiano específico optimiza la cinética de degradación de la biomasa residual y garantiza el cumplimiento de los estándares fisicoquímicos, específicamente en términos de temperatura, pH y rendimiento gravimétrico en un periodo de tiempo significativamente menor al requerido por el método tradicional. Con ello, se busca aportar una base científica rigurosa que sustente el diseño e implementación de sistemas de tratamiento de residuos que sean técnicamente viables, económicamente sostenibles y replicables en las diversas municipalidades de la región de Cajamarca y otras geografías de montaña.

Materiales y métodos

Área de estudio

La fase experimental se desarrolló en las instalaciones del vivero municipal de la ciudad de Chota, provincia de Chota, departamento de Cajamarca (Perú). El área se localiza a una altitud aproximada de 2388 m s. n. m., bajo las coordenadas geográficas 6°33'47"S y 78°38'56"O. El clima de la zona se caracteriza por ser templado-moderado, con una temperatura promedio anual de 15 °C y una humedad relativa fluctuante (Huamán, 2025). Estas condiciones de altitud son determinantes para la actividad metabólica de los consorcios microbianos en procesos de degradación de materia orgánica. Para mitigar la pérdida de calor por radiación y el contacto directo con el suelo, se acondicionó la base de las unidades experimentales con una capa de material vegetal xerofítico nativo (*Stipa ichu*), que actúa como aislante térmico y drenaje natural.

Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA), estructurado con tres tratamientos y tres repeticiones, lo que generó un total de nueve unidades experimentales independientes. Cada unidad consistió en una pila de compostaje con un volumen individual de 0,3 m³, lo que garantiza la homogeneidad en la distribución del sustrato orgánico. La asignación de los tratamientos se realizó de forma aleatoria para minimizar el error experimental. Los niveles de aplicación del consorcio microbiano se establecieron en función del peso total de la biomasa inicial.

Caracterización del sustrato, preparación del consorcio y armado de pilas

Los residuos sólidos orgánicos (RSO) fueron recolectados en el mercado mayorista «Julio Vásquez Acuña». El muestreo de los residuos se realizó de forma aleatoria simple, seleccionando fracciones representativas de la biomasa diaria para la conformación de las unidades experimentales, con el propósito de asegurar la heterogeneidad del sustrato inicial. Esta biomasa, compuesta mayoritariamente por restos vegetales y frutales, fue segregada y pesada en una balanza digital de

precisión (±0,1g) para conformar unidades experimentales de 0,3 m³ por cada pila. Para optimizar la degradación de la fracción orgánica, se elaboró un consorcio microbiano mediante la fermentación de insumos locales incubado bajo condiciones anaerobias durante siete días previos a su aplicación.

Con el fin de asegurar la calidad biológica del inóculo antes de su aplicación, se realizó una caracterización microbiológica detallada de la solución madre (Tabla 1). Los resultados confirmaron una alta densidad de bacterias ácido lácticas y levaduras, así como la ausencia de patógenos entéricos, para garantizar la viabilidad y seguridad del bioproceso. La inoculación se realizó de forma controlada a razón de dos litros diarios por pila, ajustada según los niveles de tratamiento (5 % para T2 y 10 % para T3). El armado físico de las pilas se realizó siguiendo una geometría trapezoidal (2 m de largo, 1,5 m de ancho y 1 m de altura), configuración que facilita el intercambio gaseoso y la estabilidad térmica en climas de altura, de acuerdo con los criterios operacionales descritos por Vargas-Pineda *et al.* (2019). Dicha configuración, sumada a una base de material vegetal xerofítico (*Stipa ichu*), permitió estabilizar la temperatura interna y mantener un contenido de humedad volumétrica entre el 45 % y 60 %, condiciones críticas para la actividad metabólica de los microorganismos inoculados.

Tabla 1. Formulación y caracterización microbiológica del inóculo basado en consorcios microbianos

Componente	Cantidad	Función biotecnológica
Insumos de formulación		
Suero lácteo	120 L	Fuente de bacterias ácido lácticas
Rumen bovino	30 kg	Aporte de microorganismos celulolíticos
Sangre bovina	30 L	Fuente de nitrógeno y hierro
Harina de castilla	30 kg	Sustrato energético (carbohidratos)
Levadura (<i>S. cerevisiae</i>)	3 kg	Agente fermentador
Melaza	10 L	Fuente de carbono de rápida asimilación
Perfil microbiológico		
Bacterias lácticas (BAL)	1,7 × 10 ⁸ UFC/mL	Densidad bacteriana principal
Mesófilos aerobios viables	3,3 × 10 ⁷ UFC/mL	Actividad metabólica general
<i>E. coli</i>	< 1 UFC/mL	Inocuidad biológica (ausencia)
Enterobacterias	< 1 UFC/mL	Inocuidad biológica (ausencia)
Levaduras	1,5 × 10 ⁶ UFC/mL	Agente de fermentación
Mohos	2,0 × 10 ⁶ UFC/mL	Degradación de polímeros complejos

Monitoreo de parámetros fisicoquímicos y análisis de laboratorio

El monitoreo de las variables fisicoquímicas se ejecutó de manera sistemática mediante el registro semanal *in situ* de la temperatura y el pH. Para la primera, se utilizó un termómetro digital de sonda y se promediaron las lecturas



obtenidas en los estratos superior, medio e inferior de cada pila (Borja *et al.*, 2019); por su parte, el pH se determinó empleando un potenciómetro digital portátil en una suspensión de compost y agua destilada (relación 1:5 p/v). La aireación y el contenido de humedad (45 %-60 %) se regularon mediante volteos manuales programados cada 14 días (Vargas-Pineda *et al.*, 2019) para garantizar las condiciones óptimas de degradación. Al cierre del ciclo, se calculó el rendimiento gravimétrico (%R) a través de la relación porcentual entre la masa experimental final (me) y la masa total inicial (mt), según la ecuación:

$$\%R = \frac{me}{mt} \times 100 \quad E1$$

Donde:

%R: porcentaje de rendimiento

me: masa experimental

mt: masa total

Tras la fase de maduración, se recolectaron muestras compuestas de cada tratamiento para su caracterización en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Allí se cuantificó el contenido de materia orgánica, carbono total, macronutrientes (N, P, K, Mg, Ca) y micronutrientes (Cu, Mn, Fe, B, S), aplicando protocolos analíticos estandarizados (Delgado *et al.*, 2019).

Análisis estadístico

Los datos recopilados durante el proceso de compostaje y los resultados de las propiedades fisicoquímicas fueron organizados inicialmente en hojas de cálculo de Microsoft Excel, en la que se determinaron parámetros de estadística descriptiva como la media aritmética, la varianza y el coeficiente de variación. Posteriormente, el análisis inferencial se realizó mediante los *softwares* SPSS v.26 e Infostat. Para validar la significancia de los resultados, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bajo el modelo de DCA, con la previa verificación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. En aquellos indicadores donde se detectaron diferencias estadísticas significativas, se procedió con la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0,05$) para establecer el grado de eficiencia entre los diferentes niveles de consorcio microbiano aplicados.

Resultados y discusión

Análisis del pH del compostaje utilizando consorcios microbianos

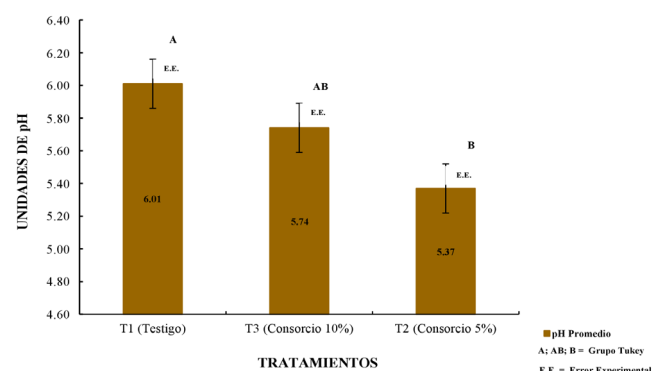


Figura 1. Efecto de la inoculación de consorcios microbianos en el pH durante el proceso de compostaje

La dinámica del pH constituye uno de los indicadores cinéticos más robustos para monitorear la actividad metabólica y la sucesión ecológica de las comunidades microbianas durante la estabilización de la biomasa residual. Los resultados analíticos revelan que la inoculación dirigida de consorcios multiespecie ejerce una influencia determinante en la trayectoria electroquímica del bioproceso, al romper los patrones de alcalinización descontrolada característicos de la degradación natural o convencional (T1). Durante las fases iniciales, la aplicación de la dosis intermedia al 5 % (T2) indujo la mayor tasa de acidificación del sistema. Este fenómeno denota una fase fermentativa altamente dinámica, caracterizada por la rápida despolimerización de carbohidratos solubles y la consecuente liberación de ácidos orgánicos de cadena corta (principalmente láctico y acético) por parte de las bacterias ácido lácticas (BAL) y levaduras inoculadas ($1,7 \times 10^8$ UFC/mL). Curiosamente, el incremento de la carga microbiana al 10 % (T3) no generó una respuesta lineal de acidificación, sino que exhibió un comportamiento amortiguador o de transición hacia la neutralidad.

Esta divergencia bioquímica queda rigurosamente demostrada mediante la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, la cual segregó el comportamiento del pH en tres dominios estadísticos nítidos: el grupo A para el tratamiento testigo (alcalino), el grupo B para la dosis al 5 % (acidofílico activo), y el grupo mixto AB para la dosis al 10 %. Este ordenamiento estadístico corrobora que la densidad del inóculo es un factor crítico de modulación ambiental, capaz de programar la velocidad de maduración química del sustrato.

A escala global, estos hallazgos convergen con los modelos cinéticos descritos por Al-Tawarah *et al.* (2024), quienes postulan que las oscilaciones reguladas del pH dentro del intervalo de 5,5 a 7,0 son reflejo fiel de una transición equilibrada entre las fases mesófila y termófila. Asimismo, investigaciones de vanguardia

biotecnológica (Manea *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025) destacan que el control de los picos de alcalinidad mediante bioaumentación previene la desprotonación del ion amonio (NH_4), al bloquear de este modo su volatilización indeseada en forma de gas amoníaco (NH_3). En términos de transferencia tecnológica y sostenibilidad global, la ligera acidificación homeostática lograda en los tratamientos bioaumentados representa una ventaja competitiva crítica; tal como sostienen Zainudin *et al.* (2022) y Hassan *et al.* (2022), un entorno químico cercano a la neutralidad disminuye la actividad de las enzimas metanogénicas y desnitrificantes, mitigando la huella de carbono del proceso por reducción de emisiones difusas de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), al tiempo que maximiza el valor fertilizante y la retención de nitrógeno en la enmienda final.

En consecuencia, la zonificación estadística (Grupos Tukey) confirma que el pH actúa como un filtro ecológico selectivo que determina el nicho de colonización microbiana. De acuerdo con los principios de sucesión discutidos por Nacimba *et al.* (2018), el ambiente químico generado en el grupo AB (T3) facilitó una transición fluida y acelerada hacia la fase de maduración, y así permitió que bacterias filogenéticamente adaptadas a la neutralidad (como los filos *Actinobacteria* y *Firmicutes*) iniciaran tempranamente los procesos de humificación. No obstante, esta variable no operó de manera aislada; la estabilidad química alcanzada es el producto directo de una interacción sinérgica multifactorial entre la densidad del inóculo exógeno y la optimización termodinámica de las pilas (Castro-Hernández *et al.*, 2023; Roy *et al.*, 2022). Por lo tanto, la clara separación estadística entre la alcalinidad del testigo y el gradiente controlado de los tratamientos inoculados valida que la bioaumentación artesanal regulada es un modelo biotecnológico eficiente y perfectamente replicable en otros contextos internacionales para la transformación de residuos urbanos heterogéneos en enmiendas orgánicas estables y de alto valor agronómico (Álvarez-Vera *et al.*, 2019; Huamán, 2025).

Evolución térmica y fases biológicas durante el compostaje

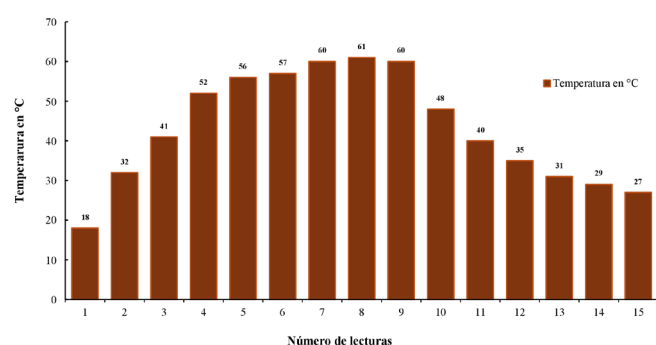


Figura 2. Evolución térmica y fases biológicas durante el compostaje en el tratamiento tres

La evolución térmica constituye el parámetro termodinámico más crítico para validar la eficiencia cinética y el éxito biotecnológico de un bioproceso de estabilización orgánica (Song *et al.*, 2018). En contextos de alta montaña y regiones altoandinas, el perfil de temperatura adquiere una relevancia científica excepcional; la baja presión parcial de oxígeno y las drásticas oscilaciones térmicas ambientales actúan como sumideros de calor que, según postula Huapaya Cruz (2024), suelen inhibir el desarrollo temprano de las comunidades mesófilas y prolongar la maduración convencional por encima de los 150 días. Bajo este escenario restrictivo, los datos iconográficos integrados en la Figura 2 demuestran que la bioaumentación con el consorcio microbiano al 10 % (T3) funcionó como un motor metabólico exógeno capaz de romper las limitaciones biofísicas impuestas por la altitud.

La fase inicial del proceso exhibió una transición mesófila acelerada (dentro de las primeras 24 a 48 horas), lo que evidencia una colonización microbiana inmediata y una alta tasa de respiración celular inducida por la carga del inóculo. Este dinamismo cinético facilitó el ingreso temprano a una fase termofílica vigorosa y sostenida. La estabilidad de este rango térmico superior, caracterizado por el mantenimiento continuo de temperaturas por encima de los 55 °C, es un indicador inequívoco de una hidrólisis enzimática eficiente de polímeros complejos como la celulosa y la lignina, aportados por los residuos heterogéneos del mercado. Tras agotar las fracciones de carbono de fácil asimilación, el sistema experimentó un descenso gradual de temperatura (fase de enfriamiento), convergiendo de manera asintótica hacia la temperatura ambiente local. Esta trayectoria describe la estabilización definitiva de la matriz orgánica y el inicio formal de la fase de maduración, lo que garantiza la obtención de una enmienda edáfica madura, higienizada y biológicamente estable.

A escala internacional, la magnitud y el sostenimiento de este perfil termofílico convergen con los modelos de balance de energía descritos por Li *et al.* (2023) y Velasquez Huacho (2024), quienes sostienen que la persistencia de condiciones termófilas reguladas es el factor determinante para acelerar el ciclo biogeoquímico de nutrientes y asegurar la desnaturalización de fitoxinas latentes. De igual manera, Gaspar *et al.* (2022) reportaron que un incremento térmico abrupto en las etapas tempranas refleja una alta carga enzimática preexistente en el sistema, lo cual optimiza la mineralización y incrementa la disponibilidad de macronutrientes solubles en el producto final.

Desde la perspectiva de la microbiología aplicada, el éxito del tratamiento T3 consolida la viabilidad de transferir este modelo de bioaumentación artesanal a otros contextos globales de montaña. Como destacan estudios de vanguardia (Carrillo Andrade, 2023; Manea *et al.*, 2024), la inoculación dirigida con consorcios que

integran bacterias termotolerantes y microorganismos celulolíticos como los optimizados a partir del rumen bovino en esta formulación permite elevar las temperaturas internas hasta umbrales óptimos para la humificación acelerada, independientemente de las restricciones climáticas del entorno geográfico. En efecto, este comportamiento térmico responde a las exigencias normativas internacionales de inocuidad ecotoxicológica y sanitaria. Tal como señalan Torres *et al.* (2023), el sostenimiento de temperaturas superiores a 55 °C por periodos prolongados es el mecanismo biológico primario y más costo efectivo para garantizar la higienización de la biomasa mediante la eliminación de patógenos entéricos de interés en salud pública (*Escherichia coli* y *Salmonella* spp.) y la pérdida de viabilidad de semillas de malezas. No obstante, en concordancia con Llave-Ciprian *et al.* (2026) y Sánchez Tigrero *et al.* (2026), el monitoreo y control operacional del proceso (mediante los volteos programados cada 14 días) impidió que el sistema alcanzara picos hipertermófilos extremos (> 75 °C) que habrían desencadenado una esterilización biológica del medio, lo que protegió la diversidad microbiana nativa y exógena necesaria para la síntesis de sustancias húmicas durante las fases terminales de maduración.

Rendimiento físico del compostaje utilizando consorcios microbianos

Tabla 2. Rendimiento de la producción de compost obtenido mediante los diferentes tratamientos de degradación microbiana.

Tratamiento	Repeticiones	Compost (kg)	Compost grueso (kg)	Compost fino (kg)
T1	R1	290,09	113,66	176,43
T1	R2	327,17	140,39	186,78
T1	R3	303,53	122,6	180,93
T2	R1	379,38	226,7	152,68
T2	R2	440,04	254,3	185,74
T2	R3	413,2	234,3	178,9
T3	R1	523,33	272,55	250,78
T3	R2	494,5	247,28	247,22
T3	R3	502,54	252,74	249,8

El rendimiento gravimétrico y la distribución granulométrica de las fracciones finales constituyen parámetros cuantitativos fundamentales para evaluar la viabilidad económica y la eficiencia de transferencia de masa en los bioprocesos de valorización de residuos. Los resultados del rendimiento productivo masal (Tabla 2) demuestran que la bioaugmentación dirigida optimiza de forma significativa ($p < 0,0001$) la obtención de enmienda estabilizada en comparación con los mecanismos de degradación natural (T1). Los datos revelan un gradiente lineal positivo entre la densidad del inóculo microbiano aplicado y la tasa de recuperación de biomasa humificada,

donde el tratamiento con mayor carga microbiológica (T3, 10 %) consolidó la máxima eficiencia productiva con una media de 506,79 kg de compost total, que superó los rendimientos de la dosis intermedia (T2, 410,87 kg) y del grupo testigo (T1, 306,93 kg).

Esta optimización del rendimiento físico se complementa con una modificación estructural en la arquitectura física del producto. El análisis inferencial demuestra que la inoculación microbiana no solo acelera las tasas de descomposición, sino que redefine la distribución de las fracciones granulométricas. Para la fracción de compost grueso, ambos tratamientos bioaugmentados (T2 y T3) se segregaron estadísticamente en el mismo dominio superior (Grupo A de Tukey, $p < 0,0001$), distanciándose significativamente del testigo (T1, Grupo B). No obstante, el hallazgo más disruptivo se observó en la fracción de compost fino (< 10 mm), donde únicamente la dosis máxima al 10 % (T3) logró un incremento granulométrico estadísticamente superior (249,27 kg; $p = 0,0002$) frente a T2 (181,38 kg) y T1 (172,44 kg). Este comportamiento diferencial demuestra que una densidad crítica de inóculo es un prerrequisito indispensable para inducir una despolimerización avanzada y homogénea del sustrato heterogéneo comercial.

A escala internacional, las investigaciones contemporáneas confirman que la bioaugmentación dirigida altera la termodinámica interna de los sistemas, lo que minimiza las pérdidas de carbono por volatilización descontrolada o lixiviación (Li *et al.*, 2023). Bajo esta premisa, la evaluación moderna de la calidad del compostaje exige enfoques predictivos y multifacéticos que integren la interacción de variables físicas, cinéticas y biológicas (Amuah *et al.*, 2025). La adición de consorcios microbianos seleccionados, ricos en bacterias ácido lácticas y levaduras fermentativas, cataliza la hidrólisis de polímeros recalcitrantes (celulosa, hemicelulosa y pectinas) dominantes en los residuos vegetales de mercados de abasto, lo que se traduce en una reducción del tamaño de partícula y en una mayor retención de masa mineralizada (Álvarez-Vera *et al.*, 2019). Esta respuesta metabólica justifica la alta eficiencia productiva del T3, al sugerir que la asimilación dirigida del carbono previene la degradación exhaustiva hacia fases gaseosas difusas, un fenómeno de estabilización y conservación de masa respaldado globalmente por Ore *et al.* (2025) y Castro-Hernández *et al.* (2023).

Desde una perspectiva agronómica y agroforestal global, la obtención de una enmienda con una alta proporción de fracciones finas estables (como la alcanzada en T3) representa una ventaja competitiva crítica para la restauración de suelos de ladera o de baja fertilidad. Como indican Sotomayor *et al.* (2022) y Hrčka *et al.* (2025), el compost con una granulometría fina homogénea incrementa exponencialmente el área superficial de intercambio catiónico en la rizósfera. De

ese modo, optimiza la capacidad de retención hídrica, potencia el crecimiento radicular y facilita la absorción selectiva de nutrientes esenciales. En consecuencia, la arquitectura de este bioproceso, fundamentada en la bioestimulación con insumos de bajo costo local y un estricto control operativo, demuestra que es factible estandarizar la producción física de abonos orgánicos bajo restricciones climáticas de altura, al transformar pasivos ambientales urbanos en insumos biotecnológicos de alta calidad y reproducibilidad internacional (Huamán, 2025; Li *et al.*, 2023).

El análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas de comparaciones múltiples de Tukey revelan que la bioaumentación dirigida ejerce un control cinético determinante sobre todas las fracciones de rendimiento y partición de masa al cierre del proceso (Tabla 3). Los modelos lineales aplicados confirman la existencia de diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,0001$) en la producción total de compost. En este parámetro, la dosis máxima de inóculo (T3, 10 %) consolidó una superioridad masal absoluta (Grupo A de Tukey; $506,79 \pm 12,90$ kg), al segregarse nítidamente de la dosis intermedia al 5 % (T2, Grupo B; $410,87 \pm 12,90$ kg) y del sistema de degradación convencional o testigo (T1, Grupo C; $306,93 \pm 12,90$ kg). Este ordenamiento estadístico trilineal demuestra rigurosamente que el rendimiento volumétrico final del bioproceso es directamente proporcional a la densidad microbiológica inoculada exógenamente.

En el dominio de la caracterización física y granulométrica, la respuesta del sistema exhibió dinámicas mecánicas y biológicas diferenciadas. Para la fracción de compost grueso, tanto la dosis al 5 % como al 10 % compartieron el mismo nivel de homogeneidad estadística (Grupo A), duplicando significativamente la masa recuperada en comparación con el testigo (T1, Grupo B; $125,55 \pm 7,92$ kg). No obstante, el comportamiento estadístico más disruptivo se localizó en la fracción de compost fino (< 10 mm), donde se detectó un

efecto de umbral crítico: únicamente la concentración máxima al 10 % (T3) logró inducir un incremento masal estadísticamente superior (Grupo A; $249,27 \pm 6,10$ kg; $p = 0,0002$) frente a T2 (Grupo B; $181,38 \pm 6,10$ kg) y T1 ($172,44 \pm 6,10$ kg), los cuales compartieron el mismo dominio de baja eficiencia. Este fenómeno corrobora que, si bien una carga microbiana moderada (5 %) es suficiente para iniciar la fragmentación macroscópica de los residuos, se requiere una densidad crítica del 10 % para catalizar la degradación avanzada de micropartículas y optimizar la homogeneidad estructural del producto.

A nivel de ecología microbiana global, la superioridad del tratamiento T3 valida que los consorcios multiespecie complejos poseen una plasticidad metabólica superior en comparación con los enfoques de inoculación monofíticos o aislados. La literatura científica contemporánea sostiene que el uso de biocomunidades metabólicamente robustas acelera de forma dramática la despolimerización de fracciones celulósicas y recalcitrantes, lo que incrementa la tasa de humificación y la síntesis de sustancias húmicas (Álvarez-Vera *et al.*, 2019; Salih *et al.*, 2026). En particular, la introducción dirigida de géneros clave como *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. no solo suprime fitotoxinas latentes mediante exclusión competitiva, sino que, bajo densidades críticas elevadas (como el umbral del 10 % validado en esta investigación), desencadena un torrente de enzimas hidrolíticas exógenas que redefinen la arquitectura física de la materia orgánica (Guzmán *et al.*, 2020). Esta ventaja termodinámica es evidente al confrontar nuestros hallazgos con matrices tecnológicas internacionales; mientras que sistemas basados en cepas específicas como *Citrobacter freundii* reportan pérdidas masivas de carbono por respiración que disminuyen el rendimiento físico final (Nacimba *et al.*, 2018), los consorcios optimizados en este estudio, que fusionan bacterias ácido lácticas de suero con la microbiota celulolítica y fibrolítica del rumen bovino, maximizan la retención y estabilización del carbono en la matriz sólida (Wang *et al.*, 2025).

Tabla 3. Análisis de varianza y comparación de medias para las fracciones de rendimiento del compostaje

Parámetro de rendimiento	Tratamiento	Media (kg)	E. E.	Grupo (Tukey)	Valor p (ANOVA)
Producción total	T3 (10 %)	506,79	12,90	A	< 0,0001
	T2 (5 %)	410,87	12,90	B	
	T1 (Testigo)	306,93	12,90	C	
Compost grueso	T3 (10 %)	257,52	7,92	A	< 0,0001
	T2 (5 %)	238,43	7,92	A	
	T1 (Testigo)	125,55	7,92	B	
Compost fino	T3 (10 %)	249,27	6,10	A	0,0002
	T2 (5 %)	181,38	6,10	B	
	T1 (Testigo)	172,44	6,10		

Nota. E. E.: representa el error estándar; letras distintas en la columna de «Grupo» indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).



Asimismo, la naturaleza del acelerador biológico codiseñado influye directamente en los tiempos de maduración y la calidad del producto. A diferencia de las enmiendas adicionadas con residuos proteicos crudos o vísceras que suelen prolongar peligrosamente la fase de descomposición y generar vectores odoríferos (Beltrán Naranjo y Pérez Montesdeoca, 2020), la bioaumentación con microorganismos eficaces (ME) estabiliza el pH y acorta los ciclos operacionales mediante un mecanismo de control de calidad intrínseco. La integración sinérgica de hongos lignocelulolíticos y bacterias fijadoras de nitrógeno, alineada con los modelos de Bermúdez-Savón *et al.* (2023), demuestra que superar el umbral del 5 % de inóculo es un prerrequisito tecnológico imperativo para transformar con éxito residuos municipales heterogéneos en abonos orgánicos estables, reproducibles y con una granulometría fina de alto valor agronómico internacional.

Contenido de micronutrientes y metales pesados del compostaje a partir de la aplicación de consorcios microbianos

Tabla 4. Perfil mineral y contenido de metales pesados en el compostaje por tratamiento

Parámetros	Tratamientos			Norma
	T1	T2	T3	NTP 201.207:2020
Cu (ppm)	28	26.67	24.00	10 a 50
Mn (ppm)	376,5	367,50	394,00	50-200
Fe (ppm)	11425	11062,50	10212,50	100-500
Zn (ppm)	157,5	161,50	181,50	20-100
B (ppm)	19	18,00	18,00	10 a 50
Pb (ppm)	19,33	19,44	18,98	< 10
Cr (ppm)	16,12	18,73	15,53	< 10
Cd (ppm)	1,29	1,12	1,16	< 1

Nota. Norma: hace referencia a los límites máximos y rangos permitidos establecidos por la Norma Técnica Peruana NTP 201.207:2020 para enmiendas orgánicas.

El análisis de micronutrientes y metales pesados en el compost obtenido (Tabla 4) revela una dicotomía crítica entre el valor agronómico y el riesgo ecotoxicológico del producto final. Por un lado, se observa que el cobre (Cu) y el boro (B) se mantienen dentro de los rangos permitidos en todos los tratamientos; sin embargo, elementos esenciales como el manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn) excedieron los límites máximos establecidos por la normativa de referencia. Esta acumulación fue significativamente mayor para Mn y Zn en el tratamiento T3 (consorcios microbianos al 10 %). Si bien la aplicación de enmiendas orgánicas incrementa la disponibilidad de micronutrientes necesarios para el sistema suelo-planta (Ore *et al.*, 2025), concentraciones excedentes como las detectadas en T3 pueden desencadenar problemas latentes de fitotoxicidad (Mahapatra *et al.*, 2022). Por

lo tanto, se vuelve imperativo el codiseño de protocolos robustos de evaluación sinérgica para determinar la estabilidad y calidad real del producto final antes de su incorporación al campo (Amuah *et al.*, 2025).

Esta tendencia de acumulación selectiva de Mn y Zn en bioprocesos acelerados coincide con lo reportado en mercados de Irak por Raheema *et al.* (2026), quienes demostraron que la rápida mineralización de la materia orgánica mediada por bioaumentación reduce drásticamente el volumen de la masa, lo que provoca un «efecto de concentración» pasivo de los cationes metálicos en la matriz final del compost. Asimismo, el hecho de que metales pesados altamente tóxicos como el plomo (Pb), cromo (Cr) y cadmio (Cd) se situaran ligeramente por encima de los umbrales de referencia, independientemente del nivel de inoculación aplicado, demuestra que la carga metálica está intrínsecamente vinculada a la naturaleza heterogénea y al origen de los residuos del Mercado de Chota, más que a la eficiencia metabólica de los consorcios.

Este fenómeno representa un desafío global para la valorización de residuos urbanos. En Colombia, Soto-Paz *et al.* (2017) evaluaron las dinámicas operacionales del compostaje en países en desarrollo y determinaron que la falta de homogeneidad en la masa de entrada y las limitaciones tecnológicas de los centros municipales de tratamiento imposibilitan el cumplimiento de los estándares normativos de calidad e inocuidad si no se aplica una estricta separación en origen antes del bioproceso. En ese sentido, la inoculación microbiana ejerce un rol complejo en la movilidad de estos elementos. Como señalan Ahmad *et al.* (2025), los microorganismos interactúan con los metales mediante procesos de biosorción, bioacumulación y cambios en el potencial redox, lo que altera su biodisponibilidad.

La absorción de estos elementos por los cultivos es altamente selectiva (Asaye *et al.*, 2022); mientras el Zn y el Cd presentan tasas elevadas de transferencia hacia los tejidos vegetales debido a su similitud iónica con nutrientes esenciales, el Pb muestra una movilidad severamente restringida en el perfil del suelo (Roy *et al.*, 2022). En contextos agrícolas específicos del norte peruano, como las zonas productoras de arroz, la presión antrópica y el uso intensivo de agroquímicos ya exacerban la contaminación por Cd en los suelos (Dioses-Vergara *et al.*, 2024); por lo tanto, incorporar un compost que exceda los límites de la NTP 201.207:2020 agravaría la acumulación progresiva de Cu, Zn y Cd en el mediano plazo (Instituto Nacional de Calidad, 2020), lo que amenaza la inocuidad alimentaria (Ramdhani *et al.*, 2026).

Por consiguiente, como sostienen Hadibarata *et al.* (2025) y Sánchez Tigrero *et al.* (2026), el cumplimiento estricto de las normativas de calidad ambiental es un indicador crítico que no puede depender exclusivamente de la remediación biológica durante el compostaje.

Experiencias en México desarrolladas por Sánchez Fernández *et al.* (2024) en la estabilización de residuos orgánicos de centrales de abasto confirman que la bioaugmentación con inóculos nativos es una herramienta poderosa para acelerar la degradación de polímeros naturales y estabilizar el carbono, pero resulta insuficiente para mitigar la carga mineral preexistente. Como concluyen también Castro-Hernández *et al.* (2023), la optimización mediante consorcios microbianos locales representa una solución de economía circular de bajo costo y alta resiliencia climática para altitudes superiores a los 2000 m s. n. m., lo que permite una estabilidad metabólica superior frente a las fluctuaciones de temperatura que limitan a los productos comerciales (Khan *et al.*, 2025). Sin embargo, para garantizar la sostenibilidad del bioproceso en Chota y transitar de forma segura hacia una enmienda de uso agrícola sin restricciones, la eficiencia biológica del inóculo nativo debe ser complementada obligatoriamente con políticas municipales de segregación rigurosa en la fuente.

Conclusiones

La bioaugmentación dirigida mediante consorcios microbianos complejos (codiseñados a partir de suero lácteo y microbiota del rumen bovino) al umbral crítico del 10 % (T3) constituye una estrategia biotecnológica altamente eficiente para optimizar la valorización de residuos sólidos orgánicos heterogéneos bajo restricciones climáticas de alta montaña. Esta matriz tecnológica ejerce un control cinético decisivo que acelera la despolimerización de polímeros recalcitrantes y reconfigura la arquitectura granulométrica del producto hacia fracciones finas homogéneas (< 10 mm). Asimismo, la inoculación rompe las barreras biofísicas térmicas impuestas por la altitud altoandina, al actuar como un motor metabólico exógeno que induce una transición mesófila inmediata y sostiene una fase termofílica vigorosa (> 55 °C) indispensable para garantizar la estabilización termodinámica y la higienización sanitaria de la enmienda frente a patógenos entéricos.

La calidad geoquímica y la inocuidad ambiental del compostaje acelerado se encuentran condicionadas de forma intrínseca por la naturaleza de la materia prima en origen, y no por la eficiencia de la bioaugmentación. El efecto de concentración pasivo, derivado de una mineralización exhaustiva del carbono y la consecuente pérdida de peso seco de la pila, provoca una acumulación estequiométrica selectiva de microelementos esenciales (Fe, Mn, Zn) y trazas de metales pesados (Pb, Cr, Cd) que exceden los límites máximos permitidos por la normativa. Aunque la densidad del inóculo al 10 % activa mecanismos concurrentes de biosorción y quelación que atenúan significativamente la biodisponibilidad de plomo y cromo, la viabilidad agronómica del producto final para un uso agrícola irrestricto depende obligatoriamente de una sinergia estructural entre la optimización biológica

del bioproceso y la implementación de políticas públicas de segregación rígida en la fuente de abasto municipal.

En términos de ingeniería ambiental y economía circular de montaña, el modelo validado se consolida como una matriz tecnológica transferible, de bajo costo operativo y alta resiliencia climática, ideal para descentralizar las soluciones biotecnológicas confinadas a regiones a nivel del mar. Esta investigación establece un precedente científico e instrumental riguroso para la replicabilidad de bioprocesos controlados en geografías altoandinas y ecosistemas globales de montaña, al demostrar que es viable transformar pasivos ambientales urbanos críticos en insumos biotecnológicos estables y de alto valor para la restauración ecológica y la conservación de suelos agrícolas vulnerables.

Contribución de autoría

Ismael Suárez: análisis formal, metodología, supervisión, validación, visualización, preparación y escritura del borrador original, y escritura y edición.

Uber L. Huamán: conceptualización, preparación y escritura del borrador original, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, *software*.

Brendy A. Uria: curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, recursos, *software*.

Héctor O. Chávez: curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, recursos, *software*.

Olegario H. Cabrera: curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, recursos, *software*.

Fuentes de financiamiento

Los autores declaran que no recibieron un fondo específico para esta investigación.

Potenciales conflictos de interés

Ninguno.

Declaración de inteligencia artificial

Durante la elaboración del presente estudio, los autores declaran haber utilizado Gemini 3 (Google) con la finalidad de enriquecer la gramática y estilo de redacción de la versión final. Seguidamente los autores revisaron y editaron meticulosamente el contenido cuando fue indispensable y asumen la plena responsabilidad por todo el contenido de la publicación.



Referencias bibliográficas

- Al-Tawarah, B., Alasasfa, M. A. y Mahadeen, A. Y. (2024). «Efficacy of Compost and Vermicompost on Growth, Yield and Nutrient Content of Common Beans Crop (*Phaseolus vulgaris* L.)». *Journal of Ecological Engineering*, 25(2), pp. 215-226. Disponible en: <https://doi.org/10.12911/22998993/176862>
- Álvarez-Vera, M., Largo, A., Iglesias-Abad, S. y Castillo, J. (2019). «Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos». *Scientia Agropecuaria*, 10(3), pp. 353-361. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172019000300005
- Amuah, E. E. Y., Fei-Baffoe, B., Miezah, K., Sarpong, Y. A. y Obiri-Danso, K. (2025). «Synergistic assessment of compost quality using a multifaceted approaches and machine learning: A research protocol». *Results in Engineering*, 27, pp. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105786>
- Asaye, Z., Kim, D.-G., Yimer, F., Prost, K., Obsa, O., Tadesse, M., Gebrehiwot, M. y Brüggemann, N. (2022). «Effects of combined application of compost and mineral fertilizer on soil carbon and nutrient content, yield, and agronomic nitrogen use efficiency in maize-potato cropping systems in Southern Ethiopia». *Land*, 11(6), pp. 1-20. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land11060784>
- Beltrán Naranjo, C. F. y Pérez Montesdeoca, P. S. (2020). «Potencial de compostaje de los residuos sólidos orgánicos generados en el Mercado Mayorista del cantón Ambato». [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20824>
- Bermúdez-Savón, R. C., García-Oduardo, N. y Aguilera-Duarte, A. L. (2023). «Biodegradación de residuos lignocelulósicos secundarios por *Pleurotus* spp.». *Tecnología Química*, 43(1), pp. 136-152. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852023000100157
- Borja, D. F., María, G. A., Yungán, J. C., Andrade, M., Barriga, P. y Brito Moína, H. L. (2019). «Optimización en el proceso de obtención de Compost y Biol». *Ciencia Digital*, 3(2.4), pp. 6-12. Disponible en: <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/502>
- Carrillo Andrade, M. R. (2023). *Bioaumentación de procesos de compostaje con microorganismos solubilizadores de fosfato: Efecto sobre los parámetros de seguimiento y calidad del producto final*. [Tesis doctoral, Universidad de Almería]. Disponible en: <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/19571/CARRILLO%20ANDRADE%2C%20MARIA%20RITA.pdf>
- Castro-Hernández, F., Navarro-Flores, J. R. y Castro-Barquero, L. (2023). «Adición de inóculos microbianos y condiciones optimizadas de elaboración en un compost comercial». *Agronomía Costarricense*, 47(2), pp. 125-144. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43676990002>
- Delgado, M. D. M., Mendoza, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L. y Martín Sánchez, J. V. (2019). «Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), pp. 965-977. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Dioses-Vergara, C. S., Góngora-Vásquez, J. J. y Ordoñez-Sánchez, L. A. (2024). «Evaluación de las concentraciones de cadmio en suelos de cultivos de arroz en diferentes niveles altitudinales en San Martín». *Revista Biodiversidad Amazónica*, 3(2), pp. 1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.55873/rba.v3i2.383>
- Gaspar, S. S., Assis, L. L. R., Carvalho, C. A., Buttrós, V. H., Ferreira, G. M. dos R., Schwan, R. F., Pasqual, M., Rodrigues, F. A., Rigobelo, E. C., Castro, R. P. y Dória, J. (2022). «Dynamics of microbiota and physicochemical characterization of food waste in a new type of composter». *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, pp. 1-15. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2022.960196/full>
- Guzmán, Á. M., Zambrano-Pazmiño, D. E., Conforme Álava, M. A., y Vera Vera, B. R. (2020). «Inóculo microbiano con capacidad celulolítica para la producción de compost en Manabí-Ecuador». *Ciencia y Tecnología*, 13(2). Disponible en: <https://doi.org/10.18779/cyt.v13i2.391>
- Hadibarata, T., Syafrudin, M., Fitriyani, N. L. y Lee, S. W. (2025). «Advancements in Composting Technologies for Efficient Soil Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Mini Review». *Sustainability*, 17(13), pp. 1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su17135881>
- Hassan, M. U., Aamer, M., Mahmood, A., Awan, M. I., Barbanti, L., Seleiman, M. F., Bakhsh, G., Alkharabsheh, H. M., Babur, E., Shao, J., Rasheed, A. y Huang, G. Q. (2022). «Estrategias de gestión para mitigar las emisiones de N₂O en la agricultura». *Life*, 12(3), pp. 1-33. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/life12030439>
- Hrčka, M., Kraus, K., Hřebečková, T., Tunklová, B., Kubeš, J. y Hanč, A. (2025). «Efectos del compost de lodos residuales y del vermicompost sobre el rendimiento y la vitalidad del trigo». *Agriculture*, 15(5), pp. 1-24. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/5/551>
- Huamán, U. (2025). *Influencia de consorcios microbianos en la descomposición de residuos orgánicos generados en el mercado mayorista de Chota-2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Chota, Cajamarca, Perú]. Disponible en: <https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/709>
- Huapaya Cruz, Y. H. (2024). «Evaluación del compostaje a diferentes composiciones para aprovechar los residuos orgánicos domiciliarios de la ciudad de Puno para contribuir en contrarrestar el cambio climático». *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 26(1), pp. 24-35. Disponible en: <https://doi.org/10.18271/ria.2024.577>
- Instituto Nacional de Calidad (Inacal). (2020). *NTP 201.207:2020 «Enmiendas orgánicas. Compost para uso agrícola. Requisitos»*. Lima: Dirección de Normalización.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. y Van Woerden, F. (2018). «What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050». *World Bank Publications*. Disponible en: https://www.ccacoalition.org/es/resources/what-waste-20-global-snapshot-solid-waste-management-2050?_cf_chl_f_tk=x.wnlfVUnoh1HB6mTzv66zkYf6zzohqNSPNX0uzImnw-1782963303-1.0.1.1-FiMiVtGwdSFez.nqCPeEg1h2CTyLdTnsJDLcv3uttE4
- Khan, M. T., Supronienė, S., Živirdauskienė, R. y Aleinikovienė, J. (2025). «Clima, suelo y microbios: interacciones que dan forma a la descomposición de la materia orgánica en tierras de cultivo». *Agronomy*, 15(8), pp. 1-31. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081928>
- Li, M., Li, S., Chen, S., Meng, Q. Y., Wang, Y., Yang, W. J., Shi, L., Ding, F. J., Zhu, J., Ma, R. y Guo, X. (2023). «Medidas para controlar las emisiones gaseosas durante el compostaje: una revisión». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), pp. 1-22. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043587>

- Llave-Ciprian, Y. J., Callasi-Choquepuma, S. y Vigo-Rivera, J. E. (2026).** «Aprovechamiento de la energía solar en la elaboración de compost de residuos sólidos orgánicos urbanos a través de un sistema con colectores solares en condiciones altoandinas». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41, pp. 383-397. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.55119>
- Mahapatra, S., Ali, M. H. y Samal, K. (2022).** «Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin». *Energy Nexus*, 6, pp. 1-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100062>
- Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M. y Nicolescu, C. M. (2024).** «Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: Current practices and potential improvements». *Sustainability*, 16(15), pp. 1-25. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su16156329>
- Ministerio del Ambiente (Minam). (2024).** «Reporte Nacional de Indicadores de la Gestión de Residuos Sólidos Municipales: Sigresol Municipal». Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos. Disponible en: <https://sistemas.minam.gob.pe/SigresolMunicipal/>
- Nacimba, G. A., Santafé Sari, D. C., y Andueza Leal, F. D. (2018).** «Tratamiento de desechos orgánicos empleando microorganismos celulíticos». *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), 30-40. Disponible en: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.819>
- Ore, D., Rumiche, D., Ponce, K., Saavedra, M. y Vasquez-Olivera, Y. (2025).** «Eficiencia de la bioestimulación y la bioaumentación en la remoción de hidrocarburos del suelo: una revisión sistemática». *South Sustainability*, 6(1), pp. 1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.21142/SS-0601-2025-e117>
- Parra, B. A., Soto, J. y Oviedo, E. R. (2024).** «Advances in research on the improvement of green waste composting in developing countries: experiences from Colombia». *Ingeniería y Competitividad*, 26(1), pp. 1-18. Disponible en: <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i1.13143>
- Raheema, R., Hadi, S. y Dirwal, A. (2026).** «Microbial bioremediation for sustainable development». *The Microbe*, 11, 100699. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.microb.2026.100699>
- Ramdhani, E. P., Pardi, H. y Ritha, N. (2026).** «Organic Waste Management Innovation through Composting Technology with Local Bio-Activators». *ALQUIMIA Jurnal Penelitian Kimia*, 22(1), pp. 88-94. Disponible en: <https://doi.org/10.20961/alchemy.22.1.112491.88-94>
- Roy, D., Gunri, S. K., Neogi, S., Ali, O., Sharma, J., Bhadu, A. y Singh, B. (2022).** «Effect of microbes in enhancing the composting process: A review». *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(23), pp. 630-641. Disponible en: <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2022/v34i232469>
- Salih, H. G., Saady, N. M. C., Zhang, B. y Albayati, T. M. (2026).** «The role of microbial inoculum in improving composting performance and promoting compost maturation: A review». *Green Technologies and Sustainability*, 4(2026), pp. 1-17. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736125001502>
- Sánchez Fernández, V., Martínez Jardines, M. Á. y Martínez Hernández, S. (2024).** «Lixiviados de residuos orgánicos municipales y bioprocesos para su tratamiento». *Pregones de Ciencia*, 1(4), pp. 39-51. Disponible en: <https://pregonesdeciencia.uv.mx/index.php/pregones/article/view/293>
- Sánchez Tigrero, S., Ramírez-Vargas, D. y García Cruzatty, L. (2026).** «Composting in agroecology: Effects on soil structure, nutrient availability and beneficial microorganisms». *Scientia Agropecuaria*, 17(1), pp. 211-225. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172026000100211
- Serna, C. A. y Serna, D. S. (2022).** «Residuos Sólidos y Cambio Climático». *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 25(50), pp. 393-399. Disponible en: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24552>
- Song, C., Zhang, Y., Xia, X., Qi, H., Li, M., Pan, H. y Xi, B. (2018).** «Effect of inoculation with a microbial consortium that degrades organic acids on the composting efficiency of food waste». *Microbial Biotechnology*, 11(6), pp. 1124-1136. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6196389/>
- Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, E. R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F. y Manyoma-Velásquez, P. C. (2017).** «Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo». *DYNA*, 84(203), pp.334-342. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.61549>
- Sotomayor, A., Mejía, P., Morocho, D., Gaona, P., Viteri, P., Medina, L. y Viera, W. (2022).** «Microbial consortiums applied in seedling production system of avocado cultivar “Criollo”». *Manglar*, 19(1), 15-23. Disponible en: <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.002>
- Suárez, I., Ruiz, O., Muñoz, P. y Ventura, I. (2025).** «Valoración económica ambiental de la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Bambamarca, Perú». *Gestionar. Revista de Empresa y Gobierno*, 5(3), pp. 24-41. Disponible en: <https://doi.org/10.35622/j.rg.2025.03.002>
- Torres V., M., Ochoa-Álvarez, N. A., Nieto-Garibay, A., Murillo-Amador, B., Lavastida P., G. y Alfonso, P. (2023).** «Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje». *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(4), pp. 1-12. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1609-91172023000400016
- Vargas-Pineda, O. I., Trujillo-González, J. M. y Torres-Mora, M. A. (2019).** «El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento». *Orinoquia*, 23(2), pp. 123-129. Disponible en: <https://doi.org/10.22579/20112629.575>
- Velasquez Huacho, G. I. (2024).** «Uso de microorganismos eficientes y su impacto térmico en el compostaje de residuos orgánicos». *Science Evolution*, 4(12), pp. 100-106. Disponible en: <https://doi.org/10.61325/ser.v4i12.131>
- Viteri, I. P. y De Jesús, C. T. (2023).** «Gestión de Residuos Sólidos con Conciencia Ecológica para la Ciudad de Babahoyo». *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), pp. 6966-6987. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7459
- Wang, X., You, G., Liu, C. y Sun, Y. (2025).** «Bioaugmentation strategies in co-composting anaerobically digested food waste with agricultural by-products: Enhancing fertilizer quality and microbial communities». *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 290(2025), pp. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117539>
- Yrigoin, H., Suárez-Medina, I. y Huatay, A. (2024).** «Disposición a pagar por la mejora del servicio de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Chota - Perú». *Gestionar. Revista de Empresa y Gobierno*, 4(2), pp. 7-22. Disponible en: <https://doi.org/10.35622/j.rg.2024.02.001>
- Zainudin, M. H. M., Zulkarnain, A., Azmi, A. S., Muniandy, S., Sakai, K., Shirai, Y. y Hassan, M. A. (2022).** «Enhancement of Agro-Industrial Waste Composting Process via the Microbial Inoculation: A Brief Review». *Agronomía* 2022, 12(1), 198. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010198>

