



MANEJO SUSTENTABLE DE TIERRAS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

Evaluación de bacterias del género *Bacillus* en la calidad del compost, a partir de residuos de hojarasca.

*Evaluation of bacteria of the genus *Bacillus* in the quality of compost, from leaf litter waste.*

*Avaliação de bactérias do gênero *Bacillus* na qualidade de composto, a partir de resíduos de seravilha.*

Aron Esneyder Polo Ganchozo

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador

aron.polo@espam.edu.ec

Jessica Maribell Tuqueres Tacuri,
María Fernanda Pincay Cantos

Artículo científico

Enviado: 22/8/2024

Aprobado: 26/3/2025

Publicado: 29/3/2025

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la incidencia del género *Bacillus* en la calidad del compost de hojarasca. Para tal efecto, se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del material experimental, se seleccionó la materia orgánica y se reactivaron las bacterias. Se emplearon cuatro tratamientos con cuatro repeticiones cada uno. Se efectuaron análisis de madurez del compost mediante la determinación de la humedad; asimismo, se aplicó la prueba de fitotoxicidad a semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) consideradas para el estudio. Los resultados muestran que, la relación entre los parámetros analizados (temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica y porcentaje de germinación) y los tratamientos, presentan una interacción importante entre la calidad del compost; además, el porcentaje de germinación, tiempo de germinación y longitud de la raíz, evidencian que las bacterias utilizadas en la investigación no tuvieron mayor impacto en el desarrollo de estas variables, ya que ninguno de los factores o interacciones tuvo un efecto estadístico significativo. Se concluye que, las bacterias juegan un rol esencial en el proceso de maduración del compost, descomponiendo la materia orgánica en nutrientes más simples y estables para la formación de humus, componente clave para la fertilidad del suelo y el desarrollo de las plantas.

Palabras clave: acción enzimática, fitotoxicidad, germinación, sustancias húmicas

ABSTRACT

In this research, bacteria of the *Bacillus* genus and their impact on the quality of the compost were evaluated. For this purpose, the physicochemical properties of the experimental material were characterized, the organic matter was selected and the bacteria were reactivated. 4 treatments with 4 repetitions each were used. Compost maturity analyzes were carried out by determining humidity; Likewise, the phytotoxicity test was applied to lettuce seeds (*Lactuca sativa*) considered for the study. The results show that the relationship between the analyzed parameters (temperature, humidity, pH, electrical conductivity and germination percentage) and the treatments present an important interaction between the quality of the compost; Furthermore, the germination percentage, germination time and root length show that the bacteria used in the research did not have a major impact on the development of these variables, since none of the factors or interactions had a

significant statistical effect. It is concluded that bacteria play an essential role in the compost maturation process, decomposing organic matter into simpler and more stable nutrients for the formation of humus, a key component for soil fertility and plant development.

Keywords: enzymatic action, germination, humic substances, phytotoxicity

RESUMO

Nesta investigação foram avaliadas bactérias do género *Bacillus* e o seu impacto na qualidade do composto. Para tal, foram caracterizadas as propriedades físico-químicas do material experimental, selecionada a matéria orgânica e reativadas as bactérias. Foram utilizados 4 tratamentos com 4 repetições cada. As análises de maturidade do composto foram realizadas através da determinação da humidade; Da mesma forma, o teste de fitotoxicidade foi aplicado às sementes de alface (*Lactuca sativa*) consideradas para o estudo. Os resultados mostram que a relação entre os parâmetros analisados (temperatura, humidade, pH, condutividade elétrica e percentagem de germinação) e os tratamentos apresentam uma importante interação entre a qualidade do composto; Além disso, a percentagem de germinação, o tempo de germinação e o comprimento da raiz mostram que as bactérias utilizadas na investigação não tiveram grande impacto no desenvolvimento destas variáveis, uma vez que nenhum dos fatores ou interações teve um efeito estatístico significativo. Conclui-se que as bactérias desempenham um papel essencial no processo de maturação do composto, decompondo a matéria orgânica em nutrientes mais simples e estáveis para a formação de húmus, componente fundamental para a fertilidade do solo e o desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: ação enzimática, fitotoxicidade, germinação, substâncias húmicas

INTRODUCCIÓN

La quema de residuos de hojarascas, a fin de evitar su acumulación posterior a la cosecha, es una práctica habitual en las zonas rurales (Stefan, 2018). En contraste, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2020) resalta que, la quema de estos residuos tiene impactos relevantes sobre los procesos ecológicos, debido a la variabilidad de las estructuras del paisaje y las distintas respuestas de la vegetación, por ello estos impactos van a depender de la intensidad, frecuencia y duración de la quema; sin embargo, entre los efectos más conocidos resaltan: pérdida de animales, pérdida de vegetación, degradación y erosión del suelo, contaminación del agua, entre otros (González, 2018).

La quema de residuos, aunque a menudo subestimada, genera impactos ambientales significativos a largo plazo. Al alterar la biodiversidad, los ciclos de nutrientes y los procesos ecológicos, esta práctica puede tener consecuencias duraderas, especialmente en ecosistemas sensibles (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2017). La frecuencia, intensidad y duración de las quemas son factores clave que determinan la magnitud de estos impactos. Si bien puede parecer una solución rápida para la gestión de residuos, es fundamental evaluar cuidadosamente sus consecuencias ecológicas a largo plazo (Valdés *et al.*, 2019).

Para Vargas *et al.* (2019) el desarrollo acelerado de la sociedad a nivel mundial ha ocasionado el incremento de residuos sólidos, entre los que destacan residuos orgánicos derivados de la actividad comercial, la industrias y los hogares. Según Musa *et al.* (2020) estos residuos están compuestos por restos alimenticios como: frutos, verduras, cáscaras; además de residuos de jardines, entre otros, cuya disposición final incorrecta genera gases de efecto invernadero que afectan directamente la calidad del aire. En conjunto estos desechos se componen por celulosa y almidón, por lo que necesitan de la acción enzimática de la amilasa y celulasa para su descomposición en moléculas

simples (Al Dhabi *et al.*, 2019). De acuerdo a Ballesteros *et al.* (2017) el género *Bacillus* comprende un grupo de especies bacterianas filogenéticas y fenotípicas, que se caracterizan por ser Gram positivas, de forma bacilar, aerobias estrictas o anaerobias facultativas, que en condiciones estresantes forman una endospora central que deforma la estructura de la célula (Pedraza *et al.*, 2019); resistente a la desecación, a los desinfectantes y a las altas temperaturas, que les permiten ser usadas durante la fase termófila del compostaje (Vásquez y Millones, 2023).

Reyes *et al.* (2018) exponen que la aplicación de celulasa en el compostaje por medio de las bacterias, contribuye en la mejora de la degradación de la celulosa; en donde la producción de enzimas está controlada por los microorganismos, por lo que se deben considerar análisis de pH, temperatura, período de incubación, fuentes de carbono y nitrógeno, a fin de mejorar la productividad de las enzimas (Akintola *et al.*, 2021). Las bacterias del género *Bacillus* desempeñan un papel crucial en el compostaje, especialmente aquellas capaces de degradar almidón. Estas bacterias poseen enzimas que rompen los enlaces del almidón, convirtiéndolo en compuestos más simples que pueden ser utilizados por otros microorganismos. Si bien los hongos son conocidos por su eficiencia en la activación del compost, las bacterias, particularmente *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Cellulomonas*, han ganado interés debido a su rápido crecimiento y capacidad de degradar una amplia variedad de sustratos (Ni'matuzahroh *et al.*, 2023).

Como ya se ha mencionado, las bacterias del género *Bacillus* desempeñan un papel fundamental en el proceso de compostaje, especialmente en la degradación de la celulosa, un componente principal de la materia orgánica. Estas bacterias contribuyen a la formación de sustancias húmicas, enriqueciendo el compost y mejorando su calidad como fertilizante (Reyes *et al.*, 2018). Este estudio, se centra en analizar la influencia de *Bacillus wiedmannii* y *Bacillus albus* en la calidad del compost elaborado a partir de residuos de hojarasca de caoba y cítricos, con el objetivo de promover prácticas agrícolas más sostenibles y amigables con el medio ambiente.

En otras palabras, la utilización de residuos de hojarasca para la producción de compost es una práctica sostenible que contribuye a la gestión de desechos y a la mejora de la calidad del suelo; en este contexto, la incorporación de bacterias específicas, como *Bacillus wiedmannii*, ha demostrado ser beneficiosa debido a su capacidad para descomponer materia orgánica de manera eficiente (Ballesteros *et al.*, 2017). *B. wiedmannii* es conocido por su potencial en la biodegradación y mineralización de residuos orgánicos, lo que facilita su transformación en un compost de alta calidad; su actividad enzimática robusta permite la descomposición de compuestos lignocelulósicos complejos, comunes en los desechos de origen forestal, mejorando así la tasa de degradación y la estabilidad del compost final (Ni'matuzahroh *et al.*, 2023).

Por otro lado, *Bacillus albus* es otra bacteria prometedora en el proceso de compostaje, pues este microorganismo se destaca por su capacidad para producir metabolitos secundarios y enzimas que favorecen la descomposición de la materia orgánica, incrementando la eficiencia del compostaje. *B. albus* también contribuye a la supresión de patógenos y al equilibrio microbiano del compost, lo que resulta en un producto final más seguro y saludable para el uso agrícola (Villareal *et al.*, 2018). La investigación en la aplicación de este tipo de bacteria en el compostaje de residuos orgánicos busca optimizar las condiciones de descomposición y mejorar la calidad del compost, promoviendo así prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Morocho y Leiva, 2019).

En consecuencia, el estudio de *B. wiedmannii* y *B. albus* en el compostaje de residuos de hojarasca es esencial para determinar cuál de estas bacterias, o su combinación, ofrece los mejores resultados en términos de calidad del compost. Evaluar su eficacia en la descomposición de materiales lignocelulósicos, su capacidad para suprimir patógenos y su impacto en las propiedades físicas y químicas del compost es fundamental para optimizar el proceso de compostaje (Vásquez, 2022).

Estos estudios no solo contribuyen a la ciencia del compostaje, sino que también tienen implicaciones prácticas en la gestión de residuos orgánicos y la producción de enmiendas orgánicas de alta calidad, beneficiando así tanto al medio ambiente como a la agricultura sostenible (Castillo, 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio, llevado a cabo en la Unidad de Investigación y Vinculación (UDIV) del Bosque Politécnico de la ESPAM MFL, tuvo como objetivo principal evaluar el potencial de las bacterias del género *Bacillus* en los procesos de descomposición de la materia orgánica en compost. Se analiza el efecto de la inoculación con especies de *Bacillus* sobre parámetros como la pérdida de masa, la temperatura, el pH y la concentración de nutrientes en el compost.

Para este trabajo, se consideró un diseño de bloques bifactorial, *tabla 1*:

Tabla 1. *Diseño experimental.*

Nomenclatura	Tratamiento	Repeticiones	Estiércol (kg)	Hojarasca (kg)
T1	A1 (hojarasca caoba)	4	7,5	35
	B1 (<i>Bacillus wiedmanii</i>)			
T2	A1 (hojarasca caoba)	4	7,5	35
	B2 (<i>Bacillus albus</i>)			
T3	A2 (hojarasca cítricas)	4	7,5	35
	B1 (<i>Bacillus wiedmanii</i>)			
T4	A2 (hojarasca cítricas)	4	7,5	35
	B2 (<i>Bacillus albus</i>)			
Total		16	120	560

Fuente: *Elaborada por los autores.*

Caracterización de las propiedades físicas y químicas de la hojarasca

Se inició con la revisión bibliográfica acerca de las características más relevantes de las hojarasca caoba y cítricas; pues, como lo menciona (Guirao, 2015) este procedimiento es fundamental en la primera etapa de toda investigación, ya que permite la identificación de lo que se sabe y de lo que se desea conocer sobre el objeto de estudio. Para la caracterización física y química de la biomasa se tomó una muestra representativa de las hojas de caoba y hojas de cítricos a las cuales se determinó la densidad aparente, el pH, la conductividad eléctrica (C.E.) y los porcentajes de P, K, Ca y Mg (Herrera-Rengifo *et al.*, 2020), según se muestra en la *tabla 2*.

Tabla 2. *Parámetros físicos.*

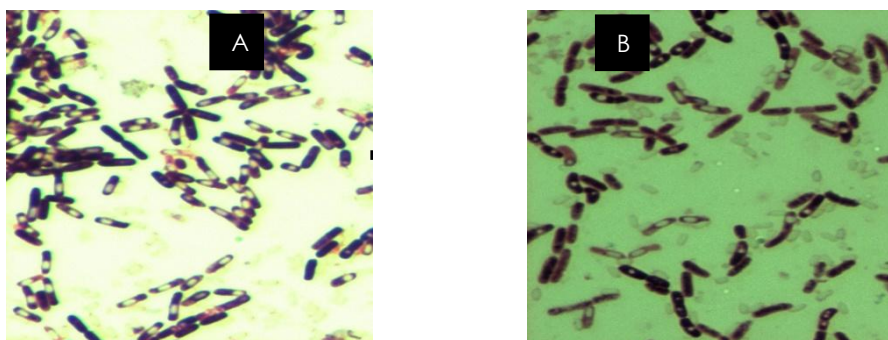
Parámetros físicos	Métodos	Materiales	Fuente
pH	Electrométrico	pH-metro	(Herrera-Rengifo <i>et al.</i> , 2020)
Conductividad eléctrica	Electrométrico	Conductímetro	
Calcio	Colorimetría	Bureta	
Magnesio	Colorimetría	Bureta	
Fósforo	Colorimetría	Espectrofotómetro	
Potasio	Colorimetría	Espectrofotómetro	
Densidad	Picnómetro	Picnómetro	

Fuente: *Elaborada por los autores.*

Reactivación de las bacterias del género *Bacillus*.

Se consideraron bacterias del género *Bacillus*, presentes en el banco de muestras de la ESPAM MFL, obtenidas a partir de la expedición realizada a la Antártida en el año 2014 y conservadas a una temperatura de -20°C. Cabe indicar que el uso de las bacterias *B. albus* y *B. wiedmannii*, resultó por referencia a lo expuesto por (Morocho y Leiva, 2019), quienes alegan que el uso de estas bacterias mejora la calidad del compost elaborado a partir de residuos agrícolas. Las bacterias se reactivaron en medio líquido (Agua peptona) 40 ml y 10 ml de melaza por 48 horas a 37°C, para luego ser diluido en 5 L de melaza y 10 L de agua, sellando herméticamente el recipiente por cinco días para su posterior aplicación a las unidades experimentales (Torres, 2016).

Figura 1. Morfología de Género *Bacillus*: A. *Bacillus wiedmannii*, B. *Bacillus albus*.



Fuente: Elaborada por los autores.

Para la elaboración del compost se utilizaron residuos de hojarasca de caoba y cítricos, los cuales fueron triturados mecánicamente hasta obtener partículas de aproximadamente 1 cm. Estos materiales se mezclaron en una proporción de 7:3 con estiércol, proporcionando así una fuente de carbono y nitrógeno para los microorganismos del compostaje (tabla 1). Se llenaron 16 tinas con los residuos correspondientes a las repeticiones propuestas, luego se mezcló hasta que quedó homogénea y se procedió a regarlo una vez por semana. Esta mezcla se realizó una vez a la semana, adaptada a la técnica de sistemas abiertos o pilas, de acuerdo a la metodología sugerida por Román *et al.* (2013) en el Manual de Compostaje del Agricultor, por medio del siguiente proceso:

Se limpió el área donde se ubicaron tinas de composteras, asegurando la eliminación de cualquier elemento que pudiera afectar el proceso de compostaje. Se utilizaron tinas de 70 cm de diámetro por 50 cm de alto. Los sustratos fueron homogenizados en un lugar aparte para luego ser depositados en las tinas, los cuales fueron amontonados y tuvieron un volumen de 42,5 kg por cada tratamiento, dando una altura de 1m cada pila.

Se aplicaron bacterias del género *Bacillus*, 2 L durante la primera semana; para ello, se inocularon las bacterias y se mezclaron con agua, luego esta mezcla se agregó a la pila del compost. Posteriormente, se revolvió bien para distribuir las bacterias de modo uniforme, lo cual también ayuda a oxigenar la pila, lo que es esencial para los microorganismos aeróbicos.

Se procedió a cubrir las tinas con plástico negro con la finalidad de incrementar una mayor capacidad de calor y por ende un mayor proceso de descomposición de la materia orgánica. El volteo de cada pila se lo realizó manualmente con una frecuencia semanal durante tres meses; este tiene como objetivo ayudar que el metabolismo aeróbico cumpla con el proceso de forma homogénea, permitiendo una temperatura uniforme (Orozco *et al.*, 2019).

Análisis de la madurez del compost por medio del establecimiento de parámetros fisicoquímicos.

Consistió en tomar una muestra de 5 kg del compost para ser evaluado. Asimismo, se determinaron otros parámetros como: temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica y porcentaje de germinación. Otros análisis realizados se describen a continuación:

Temperatura: Se midió por medio de un termómetro manual (32 a 42 °C), en el horario de 13:00 los lunes, miércoles y viernes durante dos semanas. Esta práctica se efectuó con el fin de establecer la variación de temperatura desde el primer día, tal como lo establece Tovar (2013).

Humedad: Se inició con la toma del peso inicial del recipiente vacío (previamente tarado), luego se pesó aproximadamente 1 g de muestra por cada tratamiento y se registró el peso del recipiente junto con la muestra; seguidamente se colocaron en una estufa de aire a 105 °C por 12 h. Una vez transcurrido este tiempo, se llevaron las muestras al desecador, se dejaron enfriar y se volvió a tomar el peso de los recipientes junto a las muestras secas (Aulestia, 2022). Los valores obtenidos se calcularon por diferencia de peso, tomando en consideración la siguiente ecuación establecida por este mismo autor:

$$\%Humedad = \frac{(Pr + Prmh) - (Pr + Prms)}{Prmh - Pr} \times 100 [1]$$

Donde:

Prms: Peso en gramos (g) del recipiente junto a la muestra seca.

Prmh: Peso en gramos (g) del recipiente junto a la muestra húmeda.

Pr: Peso en gramos (g) del recipiente vacío.

El **pH** fue evaluado por medio de la potenciometría en agua relación 1:2, haciendo uso de un pHmetro marca Hanna Instruments modelo pH211; tomando como referencia lo que indican Rivas y Silva (2020). Para esta práctica se colocó una pequeña cantidad de la muestra de compost (aproximadamente una taza) en un recipiente limpio y se añadió una cantidad igual de agua destilada al compost (una taza de agua por cada dos de compost). Se mezcló bien la solución con una espátula y se dejó en reposo durante 15 minutos, a fin de que los componentes del compost se disolvieran en el agua. Se sumergió el electrodo del pHmetro en la solución previamente mezclada y se dio paso a la lectura del resultado.

La **conductividad eléctrica** se evaluó por medio del método de conductimetría, utilizando un conductímetro de marca Hanna Instruments modelo DiST 3 y siguiendo el procedimiento que refieren Rivas y Silva (2020) en su trabajo acerca de la calidad fisicoquímica de tres compostajes.

Prueba de fitotoxicidad en semillas de lechuga.

Se aplicó la prueba de fitotoxicidad por medio de la evaluación de la germinación y el crecimiento del cultivo en estudio, haciendo uso de la metodología establecida por García *et al.* (2014), en la que se efectuó el siguiente procedimiento:

Se emplearon recipientes de vidrio de 15 cm de altura y 8 cm de ancho, se añadieron de forma independiente 250 g de suelo y 250 g de compost. Tanto el suelo como el compost fueron previamente tamizados con un diámetro aproximado de 10 mm y humedecidos con agua potable hasta alcanzar la humedad óptima. El test se realizó por duplicado para cada caso. Las semillas de lechuga se colocaron sobre discos de algodón de 5,7 cm de diámetro, humedecidos con agua destilada. Se colocaron en los sistemas de forma tal, que no exista contacto directo entre el disco y el sustrato, ya fuera suelo o compost según el caso en estudio.

Los recipientes se taparon y se dejó un espacio de 1 cm entre la tapa y la boca del recipiente; colocándose en un lugar seco y claro, a temperatura ambiente durante siete días (fotoperiodo de 14 horas luz y 10 horas oscuridad). Durante ese período se observó cómo ocurría el proceso de germinación en todos los tratamientos. Las plantas crecidas se observaron detenidamente para determinar si existían problemas con su desarrollo; además, se evidenció si existía necrosis o clorosis en las hojas. Las plantas que crecieron se cortaron exactamente entre la raíz y el tallo, para medir su longitud y se compararon entre todos los tratamientos.

Valoración de la calidad del compost.

Se la realizó a través de la determinación de su madurez, tomando en cuenta lo dispuesto por la normativa chilena NCh 2880 para cumplir con los requisitos de madurez en un compost; la cual indica lo siguiente: La relación C/N debe ser menor o igual a 30; caso contrario el compost se considera inmaduro y no se le aplica otro ensayo. Se deben presentar niveles dentro de los rangos establecidos para compost maduro en dos ensayos elegidos aleatoriamente, entre los del grupo 1 y del grupo 2.

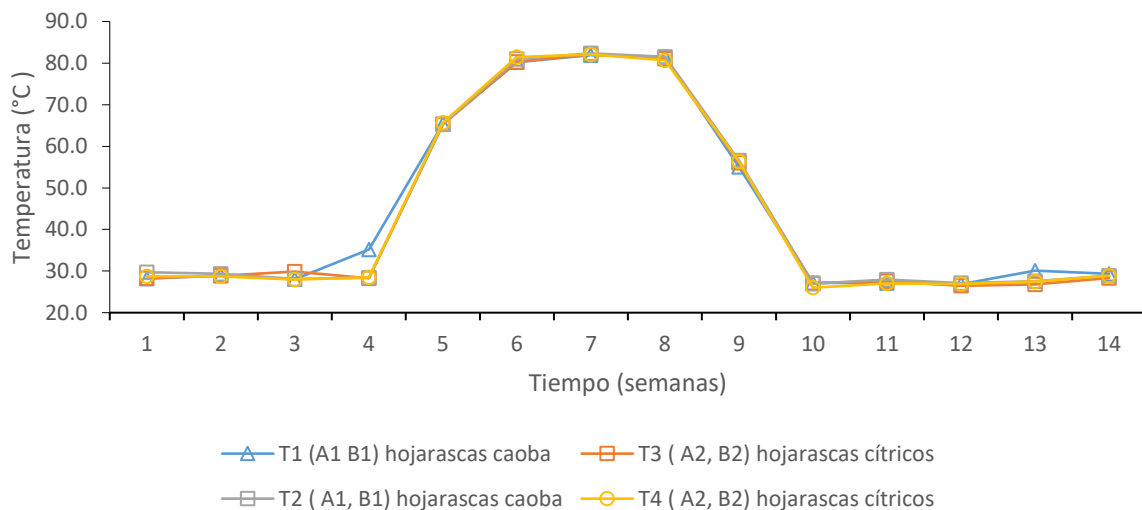
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la madurez del compost por medio del establecimiento de parámetros fisicoquímicos.

Temperatura

En cuanto a los datos de la evolución de la temperatura en el periodo de estudio, se evidenciaron varios patrones similares en todos los tratamientos (figura 2).

Figura 2. Variación de la temperatura en los tratamientos, durante el periodo de estudio.



Fuente: Elaborada por los autores.

Como se observa en la figura 2, el T1 presentó un valor inicial de 28.19 °C manteniéndose constante hasta la semana cuatro, a partir de este periodo la temperatura alcanzó un aumento notable de 65.40 °C en la semana cinco, seguido por un aumento a 80.21 en la semana seis y un máximo de 81.92 °C en la semana siete. No obstante, después de ese incremento, los valores descienden drásticamente a 27.15 en la semana 10, estabilizándose en un rango de 29.35 en la semana 14. Por su parte, el T2 inicia en 29.72 °C, presentando una leve disminución a 28.13 °C en la semana tres;

similar al T1 experimenta un aumento significativo en la semana cinco de 65.28 °C y alcanza 80.96 °C en la semana seis, llegando a 82.33 en la semana siete.

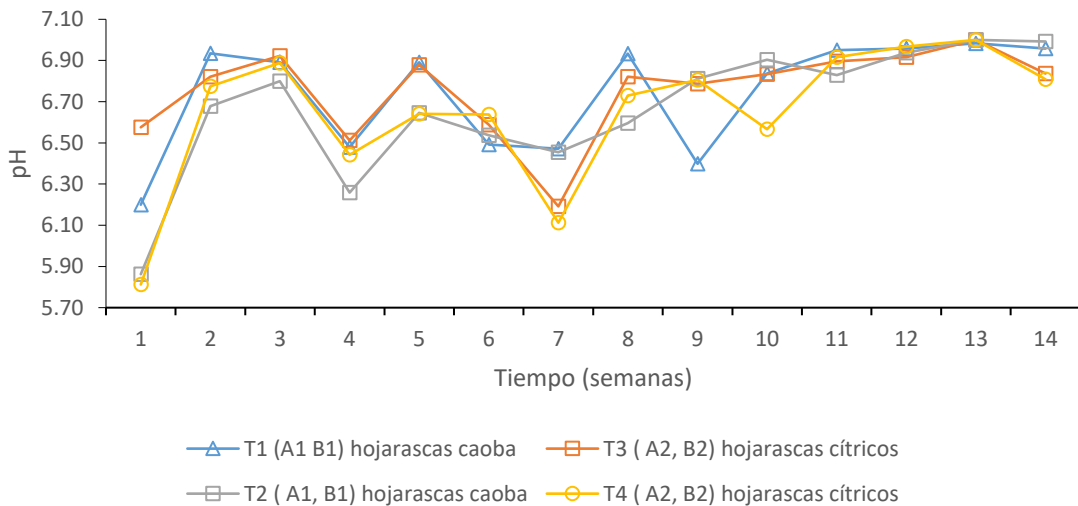
Después de estos incrementos, la temperatura disminuye a 26.97 °C en la semana 10 y finaliza en 28.91 °C; mientras que, el T3 comienza con 28.27 °C y presentando un ligero aumento en las primeras semanas, al igual que los otros tratamientos alcanza 65.28 °C en la semana cinco y 82.13 °C en la semana siete. Sin embargo, la temperatura desciende a 26.46 °C en la semana 12, hasta terminar en 28.33 °C. Finalmente, el T4 comienza en 28.75 °C y muestra una disminución gradual, alcanza 65.64 °C en la semana cinco y un máximo de 82.08 °C en la semana siete, después disminuye notablemente a 26.00 °C en la semana 10 y finaliza en 28.84 °C.

Fallas (2016) expone que, en el caso específico de mantener temperaturas similares en el compost, esta uniformidad sugiere que los tratamientos fueron sometidos a condiciones comparables a lo largo del estudio lo cual es crucial para minimizar variables externas que podrían sesgar los resultados y afectar la interpretación de los datos. Al contrario, Álvarez *et al.* (2021) afirman que es importante destacar que la presencia de picos inusuales en la temperatura de ciertos tratamientos, en momentos específicos del experimento; merece una atención especial, pues dichos picos indican la presencia de condiciones atípicas que están afectando la temperatura del compost en periodos particulares.

pH

En correspondencia al pH analizado (figura 3) durante el periodo de estudio, este presentaron variaciones significativas en cada uno de los tratamientos, como se observa a continuación:

Figura 3. Variación del pH en los tratamientos, durante el periodo de estudio.



Fuente: Elaborada por los autores.

En la figura 3, sobre la variación del pH durante el periodo de estudio, se registraron diferentes tendencias y variaciones en los valores. En la primera semana, el T1 comienza con un valor de 6.20; sin embargo, a medida que avanzan las semanas se presentan variaciones alcanzando un máximo de 6.98 en la semana 13, luego logra una estabilización de 6.96 en la semana 14. Por otro lado, el T2 inicia con un pH de 5.86 en la semana uno con variaciones constantes hasta alcanzar un valor de siete en la semana 13, evidenciando un aumento progresivo en el pH. Mientras tanto, el T3 empezó con un valor de 6.58, con un aumento gradual hasta alcanzar un valor de siete en la semana 13; no

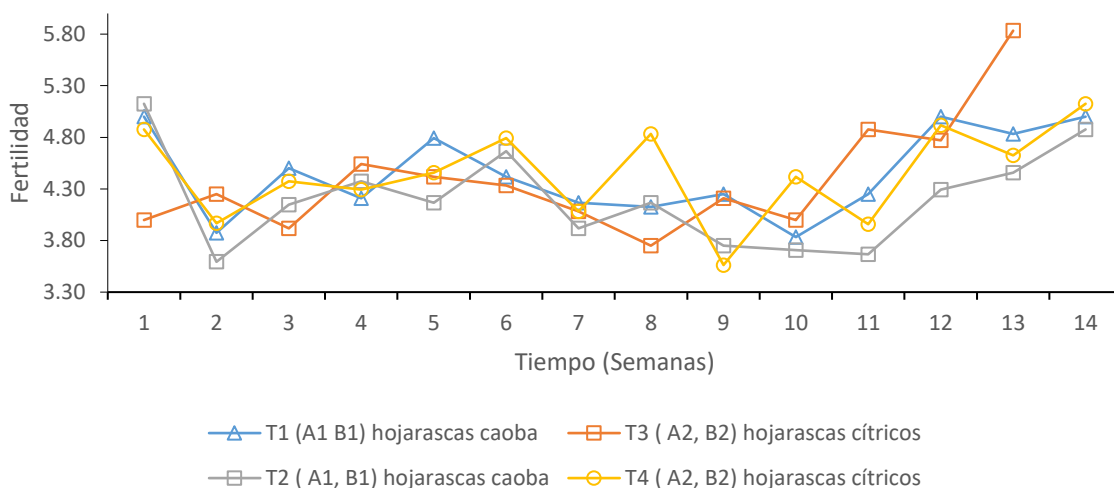
obstante, en la semana 14 hay una ligera caída a 6.84. Por último, el T4 tuvo un valor inicial de 5.81, siendo este el valor más bajo entre los demás tratamientos y también muestra un aumento inicial similar al T2, aunque sus valores fluctúan más llegando a siete en la semana 13, hasta disminuir a 6.81 en la última semana.

Según Monge (2023) las condiciones iniciales de los experimentos tienen gran impacto sobre el pH de un compost, pues factores como temperatura, humedad, presencia de microorganismos y composición de los materiales, influyen en el proceso de descomposición y por ende, en la variación del pH resultante. Por su lado, Gutiérrez (2018) expresa que el compostaje es un proceso dinámico que involucra la actividad de una amplia gama de microorganismos, los cuales pueden producir ácidos y bases como subproductos de sus actividades metabólicas; por dicha razón, es natural esperar variaciones en el pH a medida que estos microorganismos interactúan con los materiales orgánicos. Jódar (2017) menciona que, aunque exista cierta variación en el pH durante el proceso de compostaje, valores extremadamente altos pueden indicar desviaciones no deseadas en el proceso.

Fertilidad

Respecto a la evaluación de la fertilidad en el periodo de estudio, en cada uno de los tratamientos esta variable presentó variaciones significativas (figura 4).

Figura 4. Variación de la fertilidad en los tratamientos, durante el periodo de estudio.



Fuente: Elaborada por los autores.

En el parámetro fertilidad se observa que el T1 empieza con una fertilidad de cinco y presenta variaciones notables hasta descender a 3.83 en la semana 10, regresando a su valor inicial en la semana 12 y terminando con un valor final de cinco en la semana 14. Por otro lado, el T2 presentó un valor inicial de 5.13, presentando una caída de 3.59 en la semana dos; las siguientes semanas muestran un ligero aumento alcanzando 4.29 en la semana 12 antes de terminar en 4.88, mostrando una tendencia de aumento. Mientras tanto, el T3 inicia con un valor de cinco y disminuye a 3.75 en la semana nueve; no obstante, muestra un aumento notable a 4.88 en la semana 12 y finaliza en 5.83 en la semana 14, siendo este el valor de fertilidad más alto en comparación con los demás tratamientos. Finalmente, el T4 empieza con un valor de 4.88 y desciende a 3.56 en la semana nueve, similar al T3. En consecuencia, el incremento de los valores es más moderado, alcanzando 4.92 en la semana 12 y finalizando con un valor de 5.13.

Para Román *et al.* (2013) la disminución inicial en la fertilidad del compost, seguida de un ligero aumento, significa que se está dando un proceso de compostaje controlado, ya que es común que la actividad microbiana sea alta en las primeras semanas del experimento, lo que puede llevar a una descomposición acelerada de la materia orgánica. Sin embargo, Pastor (2019) sostiene que a medida que avanza el proceso de compostaje y los microorganismos descomponedores hacen su trabajo, la liberación de nutrientes aumenta nuevamente, lo que podría explicar el posterior aumento en la fertilidad. Por el contrario, Acosta y Peralta (2015) formulan que a pesar de que se haya observado una estabilización en la fertilidad del compost hacia el final del periodo de estudio, las variaciones en el tiempo indicarían que el proceso de compostaje aún no ha alcanzado un estado de equilibrio completamente deseable.

Prueba de fitotoxicidad en semillas de lechuga.

Los resultados de la germinación de las semillas a través del Análisis de Varianza permitieron evaluar la influencia de los factores y los tratamientos de cada uno de los parámetros analizados: número de semillas germinadas, tiempo de germinación y longitud de la raíz; resultados que son presentados a continuación:

Porcentaje de germinación

El análisis de varianza aplicado al parámetro porcentaje de germinación, se expone en la *tabla 3*.

Tabla 3. ANOVA porcentaje de germinación.

Análisis de Varianza para Porcentaje de Germinación – Suma de Cuadrado Tipo III					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Ración- F	Valor-P
Efectos Principales					
A.F Hojas	13,2678	1	13,2678	0,03	0,8759
B.F Bacterias	621,38	1	621,38	1,19	0,2964
Interacciones					
AB	113,156	1	113,156	0,22	0,6496
Error	6255,49	12	521,291		
TOTAL	7003,29	15			

Fuente: Elaborada por los autores.

La tabla 3 ilustra cómo el ANOVA descompone la variabilidad en el porcentaje de germinación en función de diversos factores. Al utilizar la suma de cuadrados Tipo III (por defecto), se calcula la contribución de cada factor considerando los efectos de los demás factores. Los valores de significancia estadística de cada factor se evalúan mediante el valor P. Con un nivel de confianza del 95%, ninguno de los factores o interacciones muestra un efecto estadísticamente significativo sobre el porcentaje de germinación, ya que todos los valores P son superiores a 0.05.

Según estos resultados, la falta de evidencia estadística para respaldar la influencia de las especies *B. Wieldemanii* y *B. Albus* en la germinación de semillas es notable en los tratamientos estudiados; siendo así que, González *et al.* (2018) expresan que la nula significancia estadística entre los tratamientos analizados implica que no existen diferencias marcadas en la germinación de las semillas; no obstante, otros estudios han demostrado que algunas especies de *Bacillus*, incluidas cepas de *B. albus*, tienen efectos positivos en el crecimiento de las plantas al promover la germinación de semillas y mejorar la salud de las plántulas.

Tiempo de germinación

El análisis de varianza aplicado al parámetro tiempo de germinación determinó lo siguiente (tabla 4).

Tabla 4. ANOVA tiempo de germinación.

Análisis de varianza para la duración de la germinación – Suma de Cuadrados Tipo III					
Origen	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Ración- F	Valor-P
Impacto Principal					
A.F Hojas	0,5625	1	0,5625	1,00	0,3370
B.F Bacterias	0,0625	1	0,0625	0,11	0,7446
Interacciones					
AB	0,0625	1	0,0625	0,11	0,7446
Error	6,75	12	0,563		
TOTAL	7,4375	15			

Fuente: Elaborada por los autores.

La tabla 4 presenta un análisis de varianza (ANOVA) que descompone la variabilidad en el tiempo de germinación en función de varios factores. Utilizando la suma de cuadrados del Tipo III (predeterminada), la contribución de cada factor se evalúa eliminando el efecto de otros factores. El valor P se emplea para determinar la significancia estadística de cada factor. Dado que todos los valores P son superiores a 0,05, ninguno de los factores ni interacciones muestra un efecto estadísticamente significativo sobre el tiempo de germinación con un nivel de confianza del 95%.

Los hallazgos de Dueñas (2020) indican que, bajo las condiciones experimentales establecidas, no se encontró evidencia estadísticamente significativa para apoyar la hipótesis de una relación entre las variables estudiadas. Estos resultados sugieren la necesidad de explorar otras variables o diseñar experimentos con mayor poder estadístico. Desde su punto de vista, Rodríguez (2019) indica que al no ser significativos los efectos de las especies *B. Wiedemanni* y *B. Albus*, se refuerza la idea de que estas variables no influyen en el tiempo de germinación, lo que sugiere que otros factores están jugando un papel más importante en la viabilidad de esta variable, pues se conoce que las *Bacillus* pueden acelerar el tiempo de germinación al promover condiciones favorables para el desarrollo de las semillas, como la descomposición de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes.

Figura 5. Germinación de las semillas de lechuga.



Fuente: Elaborada por los autores.

Longitud de la raíz

El análisis de varianza aplicado al parámetro longitud de la raíz se muestra en la tabla 5 a continuación:

Tabla 5. ANOVA longitud de la raíz.

Análisis de Varianza de Longitud - Suma de Cuadrados Tipo III					
Referencia	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrados Medios	Ración- F	Valor-P
Principales efectos					
A.F Hojas	2,41026	1	2,41026	1,35	0,2674
B.F Bacterias	0,195806	1	0,195806	0,11	0,7460
Interacciones					
AB	0,191406	1	0,1914061	0,11	0,7488
Error	21,384	12	1,782		
TOTAL	24,1814	15			

Fuente: Elaborada por los autores.

La tabla 5 ilustra cómo el ANOVA descompone la variabilidad en la longitud en función de diversos factores. Utilizando la suma de cuadrados del Tipo III (por defecto), se calcula la contribución de cada factor al eliminar los efectos de los demás. La significancia estadística de cada factor se evalúa mediante los valores P. Dado que todos los valores P son superiores a 0,05, ninguno de los factores ni sus interacciones tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la longitud con un nivel de confianza del 95%.

Según estos datos, es importante reconocer que el valor p no solo significa que las variables tengan un nulo efecto sobre los tratamientos, sino también, que los resultados derivan de otros factores no considerados en el estudio (Molina, 2017). Adicionalmente, De la Cruz *et al.* (2015) señalan que el hecho de que los efectos de las especies en estudio no sean significativos, puede deberse a la variabilidad natural en las respuestas de las plantas a diferentes condiciones ambientales o a la metodología utilizada en la investigación.

Figura 6. Medición de la raíz.



Fuente: Elaborada por los autores.

Valoración de la calidad del compost.

Por otra parte, se efectuó la comparación de los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio con cada uno de los parámetros propuestos por la normativa chilena para compost; la cual se encuentra regulada principalmente a través de diversas leyes, decretos y normativas técnicas que buscan establecer los requisitos y condiciones para la producción, comercialización y uso del compost. En la tabla 6 se exponen los datos de mayor relevancia:

Tabla 6. Comparación de resultados con normativa chilena.

Parámetros	Límites según norma chilena NCh 2880		
	Clase A	Clase B	Compost analizado
pH	5,0 – 7,5	5,0 – 8,5	8,3
DA (g/cm ²)	3	>5	0,41
C.E (dS/m)	3	<8	20,64
M.O	≥45	≥25	30,03
N (%)	>8		0,95
P (%)	>0,1	<0,1	0,27
K (%)	>1		1,59
Ca (%)	>1		2,11
Mg (%)	>1		0,42
Zn (ppm)	200	2000	61,5
Cu (ppm)	100	1000	26,5
Cd (mg kg ⁻¹)	2	8	0,76
Pb (mg kg ⁻¹)	100	300	22,15
C/N	≥25	≥30	18,38

Fuente: Elaborada por los autores.

En la tabla 6, se evidencia la comparación entre los resultados obtenidos del compost en estudio y los parámetros establecidos por la normativa chilena, en donde la clase A hace referencia a un compost de alta calidad; es decir, apto para uso en agricultura y jardinería sin restricciones. Por su lado, la clase B corresponde a una calidad aceptable, en donde el compost puede ser utilizado en áreas verdes y paisajismo, pero con algunas restricciones.

Básicamente, los datos generados en el laboratorio reflejan que el compost elaborado pertenece a la clase B según los límites permisibles de la normativa chilena; no obstante, algunos parámetros se encuentran por debajo de ambas clasificaciones, pudiendo otorgarse a una clase y calidad de compost aún más baja. Al respecto, Vargas *et al.* (2019) señalan que la superación de los límites establecidos para ciertos contaminantes o la deficiencia en nutrientes esenciales puede relegar a un compost a una categoría inferior, afectando su aplicabilidad y beneficios potenciales.

En este contexto, Delgado y García (2023) destacan que la normativa chilena clasifica el compost en clases A y B, dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, siendo la clase A la de mayor calidad. Según esta clasificación, los compost clase A deben cumplir con estrictos límites en cuanto a la presencia de metales pesados, patógenos y contenido de materia orgánica, entre otros parámetros (Cevallos y Sánchez, 2022). En definitiva, la normativa chilena para compost está diseñada para garantizar que el compostaje se realice de manera segura y efectiva, promoviendo la valorización de residuos orgánicos y protegiendo el medio ambiente y la salud pública.

CONCLUSIONES

El papel de las bacterias es crucial en el proceso de compostaje. La actividad metabólica de estos microorganismos, especialmente durante la descomposición de la materia orgánica, genera ácidos orgánicos y amoníaco, lo que explica los cambios observados en el pH del compost. Además, la mineralización de nutrientes por parte de las bacterias mejora la calidad del compost como fertilizante.

Los resultados obtenidos en este estudio no mostraron un efecto significativo de las bacterias inoculadas en el porcentaje de germinación, tiempo de germinación y longitud de raíz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, W. y Peralta, M. (2015). *Elaboración de abonos orgánicos a partir del compostaje de residuos agrícolas en el municipio de Fusagasugá* [Tesis de grado no publicada]. Universidad de Cundinamarca, Colombia.

Akintola, A., Oyedeji, O., Adewale, I. y Bakare, M. (2021). Production and physicochemical properties of thermostable, crude cellulase from enterobacter cloacae ip8 isolated from plant leaf litters of Lagerstroemia indica linn. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 8(4), 989-994. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2019.8.4.989-994>

Al Dhabi, N., Esmail, G., Ghilan, A. y Arasu, M. (2019). Composting of Vegetable Waste Using Microbial Consortium and Biocontrol Efficacy of Streptomyces Sp. Al-Dhabi 30 Isolated from the Saudi Arabian Environment for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 11(23), 6845. <https://doi.org/10.3390/su11236845>

Álvarez, A., Llerena, L. y Reyes, J. (2021). Efecto de sustancias azucaradas en la descomposición de sustratos orgánicos para la elaboración de compost. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.916>

Ballesteros, M., Hernández, M., Gómez, I., Mañón, M. y Carreño, M. (2017). Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación. *Centro Azúcar*, 45(1), 1-10. <https://acortar.link/OFvmZT>

Castillo, L. (2020). *Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (EM) en el distrito de Huayucachi, Huancayo, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/urK4Rh>

Cevallos, A. y Sánchez, C. (2022). *Determinación de la calidad de compost a partir de co-compostaje en lodos residuales producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales "Las Viñitas" del cantón Ambato*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/VjZqds>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2017). *La gestión y manejo de residuos sólidos y sus propuestas regulatorias e impositivas*. <https://acortar.link/AK0mAy>

De la Cruz, M., Zamudio, M., Corona, A., González, J. y Rojas, R. (2015). Importancia y estudios de las comunidades microbianas en los recursos y productos pesqueros. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(4), 99-115. <https://acortar.link/ry4fyc>

- Delgado, M. y García, C. (2023). *Contenido nutricional del compost a partir de residuos agropecuarios en la ESPAM MFL* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Manuel Félix López]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/13eJEU>
- Dueñas, K. (2020). *Relación entre la condición fisiológica de aves frugívoras y la viabilidad de semillas que pasan a través de su tracto digestivo* [Tesis de grado, Universidad de La Salle] Repositorio institucional. <https://acortar.link/TizdEO>
- Fallas, D. (2016). *Caracterización del proceso de compostaje y aprovechamiento del calor generado en un reactor bajo aireación forzada* [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/dz56FB>
- García, D., Lima, L., Ruíz, L. y Calderón, A. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de Fincas. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 14(26). <https://acortar.link/zrZlCx>
- González, P. (2018). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://acortar.link/OCUCic>
- González, L., Pita, B., Pinzón, E. y Serrano, P. (2018). Efecto de tratamientos pregerminativos en semillas de *Dianthus barbatus* L. cv. 'Purple' bajo condiciones controladas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1). <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.83>
- Guirao, S. (2015). Utilidad y tipos de revisión de literatura. *Revista Ene*, 9(2). <https://acortar.link/OJESe>
- Gutiérrez, K. (2018). *Influencia de factores ambientales de crecimiento microbiano en la degradación de polietileno de baja densidad por la bacteria pseudomona aeruginosa en Huancayo* [Tesis de grado, Universidad Continental]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/2ZNf5P>
- Herrera-Rengifo, J.D., Villa-Prieto, L., Olaya-Cabrera, A.C. y García-Alzate, L.S. (2020). Extracción de almidón de cáscara de cacao *Theobroma cacao* L. como alternativa de bioprospección. *Revista ION*, 33(2), 25-34. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n2-2020002>
- Jódar, J. (2017). Variabilidad y caracterización temporal y posicional del compostaje de residuos municipales [Tesis doctoral, Universidad de Jaén]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/xl9jVF>
- Molina, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Pediatría Atención Primaria*, 19(76). <https://acortar.link/0sTQbp>
- Monge, A. (2023). *Evaluación del efecto del uso de distintos materiales secantes y diferentes tipos de pretratamiento en el proceso de compostaje doméstico en composteras giratorias* [Tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/yRxvJu>
- Morocho, M. y Leiva, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Revista de Centro Agrícola*, 46(2), 93-103. <https://acortar.link/BjM8lv>
- Musa, A., Ishak, C., Karam, D., y Jaafar, N. (2020). Effects of fruit and vegetable waste and mixed biodegradable municipal waste composts on nitrogen dynamics in an oxisol. *Agronomy*, 10(10), 1609. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101609>

- Ni'matuzahroh. N., Affandi, M., Fatimah, A., Trikurniadewi, N., Abidin, A., Sari, S. & Khiftiyah, A. (2023). Diversity and enzymatic potential of bacteria isolated from household waste compost. *AIP Conference Proceedings*, 2554(1), 090010. <https://doi.org/10.1063/5.0109994>
- Orozco, C., Díaz, J., Macías, M. D. J., y Robles, F. (2019). Efecto de la frecuencia de volteo en el biosecado de residuos sólidos orgánicos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 979-989. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.16>
- Pastor, C. (2019). *Proyecto de diseño de un biorreactor para la producción de compost a partir de biorresiduos* [Tesis de grado, Universitat Jaume]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/L31VBD>
- Pedraza, L., López, C. y Uribe-Velez, D. (2020). Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. *Revista Acta Biológica Colombiana*, 25(1), 112-125. <https://acortar.link/ZEA8Mk>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2020). *El impacto de las quemas agrícolas: un problema de calidad del aire*. <https://acortar.link/dTXPJ6>
- Reyes, M., Oviedo, E., Domínguez, I., Komilis, D., y Sánchez, A. (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>
- Rivas, M. y Silva, R. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia Crassipes*). *Revista Ciencia Unemi*, 13(32), 87-100. <https://acortar.link/MMDCli>
- Rodríguez, E. (2019). *Factores que influyen en la viabilidad, germinación y establecimiento de *Carpinus caroliniana walt** [Tesis de grado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio institucional. <https://acortar.link/Gs5la4>
- Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2013). *Manual del compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://acortar.link/9rFE0p>
- Stefan, C. (2018). *Quema de residuos de tala rasa en el manejo de bosques implantados* [Trabajo de grado, Universidad Nacional del Nordeste]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/YNeyxZ>
- Torres, W. (2019). *Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la paja de trigo (*triticum ssp*) en el barrio de Nicrupampa, distrito de Independencia, Huaraz, 2015* [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/iQuSpO>
- Tovar, F. (2013). *Determinación de las curvas de temperatura de mezclas de restos de poda de jardinería pública y estiércol de vaca para su compostaje* [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica de Orihuela]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/ITygbg>
- Valdés, A., López, E. y Alonso, A. (2019). Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica. *Universidad y Sociedad*, 11(4). <https://acortar.link/PeYPRw>

- Vargas, O., Trujillo, J. y Torres, M. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Revista Orinoqui*, 23(2). <https://acortar.link/L49WHT>
- Vásquez, E. (2022). *Consortios microbianos para potenciar el compostaje de residuos sólidos orgánicos urbanos a bajas temperaturas* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional. <https://acortar.link/iqOddv>
- Vásquez, E. y Millones, C. (2023). Isolation and Identification of Bacillus Bacteria from Composted Urban Solid Waste and Palm Forest in Northern Peru. *Microorganisms*, 11(3), 187-191. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030751>
- Villareal, M., Villa, E., Cira, L., Estrada, M., Parra, F. y Santos, S. (2018). El género Bacillus como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista mexicana de fitopatología*, 36(1), 95-130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>