

Producción y caracterización de compost derivado de residuos sólidos orgánicos urbanos

Production and characterization of compost derived from municipal organic solid wastes

Janyra Grehis Aguirre-Illatopa¹ ; Nelino Florida-Rofner*¹ ; Emilio Anthony Ríos-Velasquez¹ ; José Dolores Lévano-Crisóstomo¹ 

¹Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Departamento de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua. Tingo María, Perú; e-mail: yanira.aguirre@unas.edu.pe; nelinof@hotmail.com; emilio.rios@unas.edu.pe; jose.levano@unas.edu.pe

*autor de correspondencia: nelinof@hotmail.com

Cómo citar: Aguirre-Illatopa, J.G.; Florida-Rofner, N.; Ríos-Velasquez, E.A.; Lévano-Crisóstomo, J.D. 2024. Producción y caracterización de compost derivado de residuos sólidos orgánicos urbanos. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(1):e2432. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n1.2024.2432>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: mayo 15 de 2023

Aceptado: mayo 27 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Perú generó 8.215.355 t de residuos sólidos municipales en el 2021; de este, 57,64 % corresponde a residuos orgánicos (RO) y 61,28 % son dispuestos en rellenos sanitarios con múltiples deficiencias de gestión, lo que exige buscar alternativas para tratar de manera segura los RO. Frente a esta situación, el compostaje permite la biotransformación, la reducción y la obtención de biofertilizantes, que se pueden aplicar como sustrato o enmienda. El objetivo de la investigación fue evaluar indicadores de procesamiento y calidad de compost derivado de residuos sólidos orgánicos urbanos, en Leoncio Prado, región Huánuco, Perú. Se evaluaron los tipos de residuos, basados en la normativa peruana para caracterización de residuos, los indicadores del proceso (temperatura y pH), la caracterización fisicoquímica y calidad en base a las normas internacionales. Los resultados muestran diferencia significativa para pH, nitrógeno, calcio, potasio, cobre y zinc; contrariamente, la materia orgánica, el % de cenizas, la conductividad eléctrica, el sodio y el fósforo no mostraron diferencias, siendo lo más destacado los altos niveles de pH, además, la calidad del compost es de "Clase B", según la norma chilena 2880. Los compost producidos son de calidad media y se recomienda su uso como sustrato o enmienda en la agricultura, previo tratamiento para corregir los altos niveles de pH.

Palabras clave: Biotransformación; Caracterización fisicoquímica; Enmienda orgánica; Macronutrientes; Micronutrientes.

ABSTRACT

Peru generated 8,215,355 t of municipal solid waste in 2021, of which 57.64% corresponds to organic waste (OW) and 61.28% is disposed of in landfills with multiple management deficiencies, which makes it necessary to seek alternatives to safely treat OW. In view of this situation, composting allows biotransformation, reduction and obtaining biofertilizers that can be applied as a substrate or amendment. The objective of the research was to evaluate the processing indicators and quality of compost derived from urban organic solid waste in Leoncio Prado, Huánuco-Peru. Waste types were evaluated based on Peruvian regulations for waste characterization, process indicators (temperature and pH), physicochemical characterization and quality based on international standards. The results show significant differences for pH, nitrogen, calcium, potassium, copper and zinc; on the contrary, organic matter, % ash, electrical conductivity, sodium and phosphorus showed no differences, the most outstanding being the high pH levels, and the quality of the compost is "Class B" according to Chilean standard 2880. The compost produced is of medium quality and is recommended for use as a substrate or amendment in agriculture after treatment to correct the high pH levels.

Keywords: Biotransformation; Macronutrients; Micronutrients; Organic amendment; Physicochemical characterization.

INTRODUCCIÓN

El sector competente en materia ambiental de Perú es el Ministerio del Ambiente (MINAM) y las estadísticas al 2021, reporta que la generación total de residuos sólidos municipales es de 8.215.355 t y solo 5.034.337 t llegan a los rellenos sanitarios formales, lo que equivale al 61,28 % del total generado; además, la generación per cápita del país ha mostrado un ligero incremento en el periodo 2018-2021, de 0,55 a 0,58 kg.persona⁻¹.día⁻¹ (MINAM, 2019). El incremento de la población y la generación per cápita es una potencial amenaza; sin embargo, los residuos sólidos orgánicos representan el 57 % del total, disponiendo de un gran volumen de residuos con potencial para ser tratados y transformados en productos aprovechables (MINAM, 2021).

La municipalidad Provincial de Leoncio Prado, desde el 2011, realiza el programa de separación en la fuente y recolección selectiva de los residuos sólidos, evitando el arrojado de residuos sólidos al río Huallaga, principal fuente hídrica de la zona (Florida & Reategui, 2019).

La técnica del compostaje permite que el proceso de biodegradación se lleve a cabo de forma controlada de residuos y de subproductos orgánicos, transformándose en compost, que son fuentes de nutrientes y vida microbiana para el suelo y muy necesarios para la nutrición de las plantas (Florida-Rofner *et al.* 2020; Peralta-Antonio *et al.* 2019; Sharma *et al.* 2017). El compostaje requiere control y manejo adecuado para garantizar que se produzcan las diferentes etapas del procesamiento y genere las condiciones apropiadas para el desarrollo microbiano y estos metabolizan los residuos e higienizan el compost producido (FAO, 2013).

El compost final, independientemente del material de origen, requiere un control de calidad para evitar potenciales efectos negativos al medio ambiente (Rosal *et al.* 2007; Ramos Agüero & Terry Alfonso, 2014), la economía de los agricultores por bajos aportes de nutrientes, elevadas concentraciones de sustancias fitotóxicas (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020) o, peor aún, la presencia de metales pesados (Nuñez *et al.* 2023) y microorganismos de origen fecal que pueden afectar la inocuidad de los productos agrícolas (Alvarez-Vera *et al.* 2019; García-Ramos *et al.* 2019).

En el caso de Perú, se dispone de la norma técnica NTP 201.207, del Instituto Nacional de Calidad-INACAL (2021), para hacer el control de calidad al compost, elaborado a partir de residuos sólidos orgánicos municipales; sin embargo, se considera que la norma técnica oficial chilena 2880 (INN, 2004) es más rigurosa (Florida-Rofner *et al.* 2020), para garantizar la calidad y el uso del compost elaborado a partir de residuos sólidos urbanos, como sustrato (Bárbaro *et al.* 2019) o enmienda en suelos agrícolas (Ríos-Velasquez *et al.* 2023; Sharma *et al.* 2017).

En este contexto, la investigación planteó como objetivo evaluar indicadores de procesamiento, de caracterización y de calidad de compost, derivado de residuos sólidos orgánicos urbanos, en Leoncio Prado, región Huánuco, Perú, a través de la norma

colombiana- NTC 5167 (Icontec, 2011) y chilena - NCH 2880 (INN, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de trabajo. El procesamiento y la caracterización del compost se realizó en la planta de valorización “Shapajilla” administrada por la municipalidad provincial de Leoncio Prado, que recibe los residuos generados por una población de 51.415 habitantes (INEI, 2022), con generación per cápita regional de 0,7 kg.hab⁻¹. día⁻¹ (MINAM, 2021). La planta se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas S 9°14'00”, O 75°59'30”, a una altitud aproximada de 700 m s.n.m. La provincia presenta clima de tipo subtropical, con temperatura de 25 a 27 °C, precipitación anual de 3.400 mm, humedad relativa superior al 80 %, cuyos meses de mayor precipitación se produce entre noviembre a febrero y menor, de mayo a julio (SENAMHI, 2021).

Instalación de pilas. Las pilas se instalaron con residuos sólidos orgánicos recolectados de la zona urbana de la ciudad de Tingo María. Los residuos se acopiaron durante siete días, para tener un volumen aproximado de 20 m³; a partir de allí, se iniciaron las evaluaciones. Además, durante el compostaje en el primer y cuarto volteo de las pilas, se aplicaron microorganismos eficientes (EM), 40 L por pila, a una concentración de 10 % de EM activado. Los EM son preparados de manera artesanal por personal de la planta, usando, como principal insumo, la melaza de caña, leche fresca, levadura y cepa madre de los EM; los análisis microbiológicos de la cepa madre presenta: enumeración de microorganismos aerobios 12x10⁴, actinomicetos 22x10³, mohos y Levaduras 34x10³ MO mL⁻¹ de solución y ausencia de *Salmonella* sp. y coliformes.

Caracterización y control de indicadores del procesamiento. La clasificación de los materiales sometidos a compostaje fue realizada de acuerdo con los lineamientos metodológicos para el estudio de caracterización de los residuos sólidos urbanos, consignada en la Resolución Ministerial No. 457-2018-MINAM (MINAM, 2018). La caracterización se realizó al inicio del proceso y consistió en extraer 3 muestras por pila, un volumen determinado con un balde de 6 L de capacidad; esto fue pesado y sometido a selección de los diferentes residuos orgánicos y pesado de manera individual y fueron tabulados y presentados porcentualmente. Los indicadores del procesamiento, temperatura (T°) y pH se evaluaron de acuerdo con las recomendaciones de la FAO (2013). Las mediciones de temperatura fueron tomadas por métodos directos, a través de geotermómetro digital Soil-Meter y el pH, con pH-metro Three-Way Meter, ambos con varillas de 0,30 m. Las lecturas de T° y pH fueron realizadas cada tres días y en tres posiciones diferentes de la pila (tercio superior, intermedio y tercio inferior).

Determinación de indicadores físicos y químicos del compost. Culminado el procesamiento, al producto final, previamente tamizado (Tamiz de 1,50 cm), se realizó el muestreo correspondiente, extrayendo 5 muestras de 1 kg, de manera aleatoria en cada pila y se evaluaron indicadores físicos: % de cenizas por calcinación y % de humedad por gravimetría. Indicadores químicos: pH por

método electrométrico; contenido de materia orgánica en base seca por el método de digestión ácida (Walkley & Black, 1934); el fósforo (P_2O_5), por Metavanadato y lectura en espectro UV-Visible; nitrógeno (N), con el método Kjeldahl; Ca, Mg, K y Na, por acetato de amonio y lectura en espectrofotómetro de absorción atómica (EAA); además, los metales Cu, Fe, Mn y Zn, por extracción con solución nítrico perclórico 4:1 y lectura en EAA, protocolos descritos en Bazán Tapia (2017).

Calidad del compost. El compost final de cada pila fue sometida a un proceso de tamizado (Tamiz de 1,50 cm), donde las partículas o desechos orgánicos grandes fueron separados y utilizados como cubrimiento en las pilas frescas, para reducir la presencia de moscas. Los resultados de los análisis examinados en el laboratorio fueron comparados con la NCH 2880 y la NTC 5167, para clasificar la calidad del compost elaborado.

Diseño y análisis estadístico. Corresponde a una investigación no experimental mixta, por que abarca la parte descriptiva y

comparativa, ajustada a un diseño estadístico, completamente aleatorizado (DCA), donde los tratamientos la constituyeron las diferentes pilas de compost producidos: Pila 1 (P1), Pila 2 (P2), Pila 3 (P3), Pila 4 (P4) y Pila 5 (P5), con tamaño de muestra; $n=25$ (5 muestras por pila de compost producida). Los datos se sometieron al análisis de varianza (ANOVA) y las correspondientes pruebas post-hoc de Tukey, con un nivel de confianza al 95 %, para la comparación de medias de los parámetros físicos y químicos entre tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los residuos orgánicos urbanos. Previo al inicio de las evaluaciones se realizó la caracterización de los residuos orgánicos a cada pila que se sometió al compostaje. No se presentaron diferencias significativas en todos los tipos de residuos, excepto para las pepas (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de la caracterización de los residuos sólidos orgánicos urbanos empleados para realizar compost en Leoncio Prado, región Huánuco, Perú.

Pila	Restos de comida (g)	Restos de frutas (g)	Cáscaras (g)	Pepas (g)	Estiércol y huesos (g)	Peso de muestra (g)
P1	2203,33±100,17a	633,33±41,63a	2100±141,07a	273,33±30,55ab	75±47,69a	5318,33±201,02a
P2	2093,33±55,08a	683,33±49,32a	2150±50a	281,67±7,64ab	126,67±25,17a	5335±58,95a
P3	2220±111,36a	680±30	1976,67±132,79a	301,67±22,55b	115±18,03a	5293,33±102,63a
P4	2143,33±90,19a	703,33±25,16a	2013,33±92,92a	240±10a	86,67±32,15a	5201,67±50,08a
P5	2333,33±150,11a	676,67±55,08a	1993,33±55,08a	273,33±23,09ab	116,66±15,28a	5393±227,23a
F	2,189	1,132	1,623	3,482	1,614	0,678
Sig.	0,144ns	0,395ns	0,243ns	0,05*	0,245ns	0,622ns

P: Pilas sometidas al compostaje; F: función de probabilidad; Sig. Significancia; * significativo $p<0,05$; letras diferentes expresa diferencias significativas.

En general, los restos de comida, cáscaras y frutas representan entre 92-93 % del total de cada pila, por lo que se esperaba homogeneidad en la calidad del compost final, para todas las pilas.

Indicadores del procesamiento

Temperatura y pH. La T° y pH son indicadores importantes que permiten diferenciar si las pilas alcanzaron las diferentes etapas del proceso (FAO, 2013). En la figura 1a, se puede observar el incremento y disminución de la T° en cada volteo; es importante indicar que todas las pilas alcanzaron la fase termófila durante el procesamiento. Respecto al pH (Figura 1b), se presentaron valores bajos al inicio del compostaje y luego tendieron a incrementarse.

Los cambios de T° definen las etapas del proceso, resultado de las reacciones exotérmicas generado en los procesos biooxidativos; por ello, Hernández-Nazario *et al.* (2018), lo consideran como bioindicador del procesamiento.

Los resultados, en los primeros tres días, superaron los 45 °C, porque las pilas ya tenían un periodo mínimo de una semana de acopio; también, la etapa termofílica alcanzó temperaturas medias de hasta 68 °C y se extendió entre 90 y 105 días, aproximadamente y, a partir de allí, inició el enfriamiento de las pilas. Estos resultados se encuentran dentro de los periodos de cada fase señaladas por la FAO (2013).

Es importante indicar que se constató que las pilas no pasaron por la fase de maduración y el compost fue colocado en costales de 50 kg y distribuido, aspecto que es contrario a los criterios técnicos establecidos para un procesamiento óptimo y, probablemente, afecte algunos indicadores de calidad del compost final, como el pH (Dalzell *et al.* 1981; Florida & Reategui, 2019).

Además, los resultados mostraron una prolongada etapa termofílica, aspecto positivo solo para la higienización; este comportamiento se atribuye a factores climáticos locales, características de las pilas y

los microorganismos eficientes, aplicados durante el proceso. Las variaciones de la T° tienen el mismo patrón respecto a otros tipos de residuos compostados en el ámbito local, como el compost de

estiércol de vacuno, las plumas de pollo (Florida & Reategui, 2019) y diversos residuos orgánicos locales (Florida *et al.* 2016).

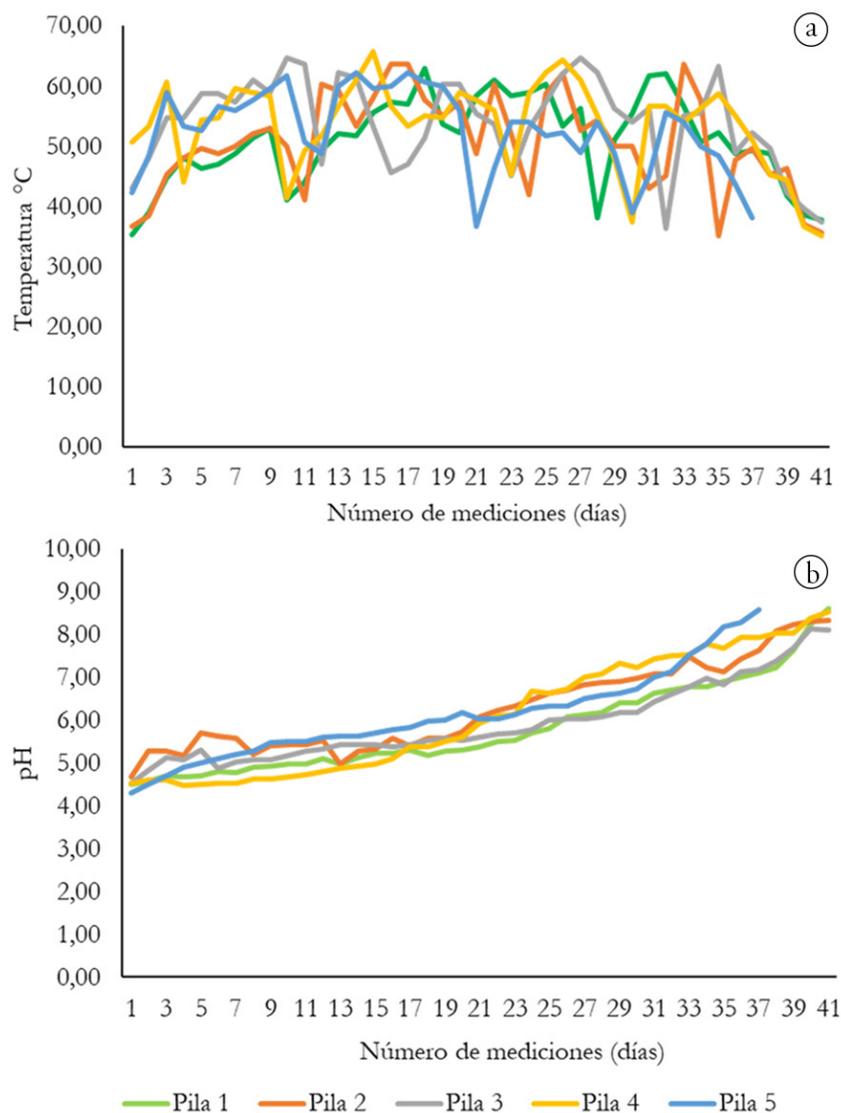


Figura 1. Temperatura y pH de diferentes pilas durante el procesamiento de compost a partir de residuos sólidos orgánicos urbanos. a) Temperatura; b) pH.

El pH en todas las pilas, al primer día de evaluación, fue bajo (Figura 1b), contrario a lo encontrado por Dalzell *et al.* (1981), quienes observaron que los valores de pH al inicio fueron relativamente altos y descendieron rápidamente en la etapa mesofílica, para elevarse a medida que la pila incrementa su temperatura y pasó a la fase termofílica; luego, se estabilizó con pH alto en la fase de enfriamiento y, al final, descendió ligeramente en la última fase de madurez. Los resultados no son incoherentes, ya que las pilas se reunieron progresivamente durante una semana, es decir, la pila ya había pasado la fase inicial o fase mesófila, por ello, los niveles bajos de pH. El descenso es resultado de procesos biooxidativos de compuestos solubles (azúcares), en la primera fase del proceso, produciendo ácidos orgánicos, que provocan reducción del pH, entre 4,0 a 4,5; sin embargo, esta rápida utilización de los

compuestos solubles genera la fase termófila (FAO, 2013), lo cual, es muy importante, tanto para la degradación como para la higienización (FAO, 2013; Florida & Reategui, 2019). En general, los resultados están dentro de los rangos tolerables de pH, propuestos por la FAO (2013).

Indicadores físicos del compost final

Contenido de humedad y cenizas. Como se evidencia en la tabla 2, no se presentaron diferencias significativas entre las pilas para el porcentaje de humedad y de cenizas. Los valores obtenidos sugieren que las condiciones de procesamiento fueron homogéneas y, de acuerdo con estos dos indicadores, el compost de todas las pilas corresponde a la clase A, según la NCH 2880. La humedad es un

indicador importante para establecer los criterios de aplicación en la agricultura, teniendo en cuenta que el porcentaje de humedad del producto tiene correlación negativa con la mayoría de los nutrientes, como N, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn (Bohórquez *et al.* 2015). Además, es preciso mencionar la importancia del control de la humedad para obtener un compost de calidad, ya que el exceso de humedad compromete el peso del producto y puede afectar los cálculos de la cantidad efectiva a aplicar (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020).

En cuanto al porcentaje de cenizas, no se encontraron diferencias significativas y todas las pilas se encuentran dentro de lo establecido

por la normativa y corresponden a un compost de clase A. El resultado obtenido, probablemente, está relacionado con la homogeneidad de los restos identificados en la caracterización; sin embargo, los valores medios están próximos al límite, lo que indicarían la presencia de sales minerales, lo cual, se debe a que los residuos sólidos orgánicos urbanos contienen alta concentración de sales al tener alimentos procesados con importantes contenidos de sal (Iñiguez *et al.* 2006); no obstante, los valores encontrados no tienen influencia sobre las funciones del compost como sustrato o enmienda y no compromete la calidad (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020).

Tabla 2. Calidad de compost final producidas con residuos sólidos orgánicos urbanos en diferentes pilas y contrastadas con la norma de calidad chilena.

Indicador	Calidad		Tratamientos				
	Clase A	Clase B	P1	P2	P3	P4	P5
pH*	5-7,5	<5 y >7,5	9,10±0,02a	9,22±0,05b	9,45±0,04d	9,32±0,04c	9,37±0,02c
CE (µS/cm)	<3000		4754±966a	4784±1308a	3714±1551a	4068±323a	4272±332a
% Humedad*	< 25	25-40	18,53±2,09a	18,97±2,19a	16,86±0,92a	15,07±1,40a	17,06±10,72a
% Cenizas**	Max. 60		51,21±4,21a	48,89±4,99a	44,40±5,13a	52,44±6,05a	48,63±12,67a
% M.O.*	> 45	25-45	48,79±4,58a	51,11±4,99a	55,60±5,13a	47,56±6,05a	51,37±12,67a
% N*	> 0,8%		2,11±0,15a	2,70±0,32c	2,38±0,17abc	2,22±0,09ab	2,69±0,40bc
% P ₂ O ₅ *	>1		1,37±0,20a	1,72±0,11a	1,42±0,12a	1,53±0,26a	1,58±0,28a
% Ca*	>1		2,55±0,08b	2,74±0,14b	3,03±0,10c	2,20±0,18a	2,58±0,14b
% Mg*	>1		1,20±0,10a	1,06±0,27a	1,28±0,16a	1,00±0,00a	1,12±0,04a
% K*	>1		2,57±0,24a	2,42±0,35a	3,14±0,09b	2,28±0,22a	2,25±0,12a
Cu (ppm)*	<100	100-1000	21,91±2,31b	17,01±2,14a	23,01±1,75b	22,63±1,38b	22,45±1,41b
Zn (ppm)*	<200	200-2000	84,02±4,58bc	67,09±4,33a	76,81±3,27abc	86,17±6,71c	71,02±14,45ab
Calidad final según pila			B	B	B	B	B

Media±desviación estándar; letras diferentes expresa diferencias significativas ($p < 0,05$); *Norma oficial chilena - NCH 2880 (INN, 2004); ** Norma técnica colombiana - NTC 5167 (Icontec, 2011). P1 al P5 pilas compostadas.

Conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno. La conductividad eléctrica para todas las pilas se encontró dentro de lo establecido por la NCH 2880 y no se presentaron diferencias significativas (Tabla 2); sin embargo, de acuerdo con este indicador, el compost es de calidad media o clase B, al presentar valores entre los 3.000 a 8.000 µS/cm, lo que indicarían algunas restricciones para ser utilizado en la agricultura. Este resultado esta probablemente relacionado con la homogeneidad y la composición de los residuos compostados, la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso y la concentración de sales.

Una CE mayor 3.000 µS/cm se encuentra relacionada con la inhibición de la germinación de las semillas (Rivas-Nichorzon & Silva-Acuña, 2020). En particular, el compost a base de residuos

sólidos orgánicos urbanos, generan altos valores de CE (Rawat *et al.* 2013), por lo que su aplicación en campo se debe tomar en cuenta, para evitar una posible salinización del suelo o problemas de fitotoxicidad (Jaramillo, 2002); las altas cantidades de sales en la solución del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas (Sánchez-Monedero *et al.* 2001).

Se encontraron diferencias altamente significativas para los valores medios del pH (Tabla 2). El pH fue comparado con la NCH 2880, en la cual, se determinó que se encuentran por encima de los valores establecidos para compost de clase A y corresponden a compost de clase B. Los residuos orgánicos urbanos se caracterizan por tener contenido importante de proteínas, los que al descomponerse pueden incrementar el valor del pH (Chang & Hsu, 2008); esto

se vio reflejado con valores del pH por encima de 9,10, lo que presentarían algunas restricciones de uso. Además, el pH elevado, al parecer, es independiente al periodo de volteo y al tiempo de compostaje y más bien respondería a los materiales sometidos al proceso (García Céspedes *et al.* 2014; Florida & Reategui, 2019; Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020).

Los niveles de pH son fuertemente alcalinos en todas las pilas, probablemente, por una concentración baja de iones hidrógeno y mayor de calcio, magnesio y sodio. En este caso, se advierte potenciales riesgos sobre la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, por ello, es necesario aplicar técnicas para corregir el pH, mediante la adición de azufre, sulfato ferroso, sulfato de aluminio u otros compuestos azufrados, antes de su uso en agricultura (Bárbaro *et al.* 2019).

Los resultados de pH no son adecuados; no obstante, se observan valores similares en compost con base en otros residuos, como los elaborados con la cáscara de cacao, con los residuos municipales, con estiércol de vacuno (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020) y con una mezcla de plumas de pollo y estiércol de vacuno (Florida & Reategui, 2019). En este contexto, se requieren la aplicación de técnicas de solarización para disminuir el porcentaje de humedad y la corrección del pH, mediante la adición de azufre, sulfato ferroso, sulfato de aluminio u otros compuestos azufrados (Bárbaro *et al.* 2019), antes de ser utilizados como enmienda o sustrato.

Materia orgánica y nitrógeno. Los valores de MO no presentaron diferencias significativas; contrariamente, los valores de N sí presentaron diferencias altamente significativas (Tabla 2).

Los valores medios del MO corresponden a compost de clase A, aspecto importante, ya que al ser aplicados al suelo mejoran las condiciones fisicoquímicas y aportan carbono, para mantener la biodiversidad del sistema (FAO, 2013); por ello, es importante resaltar que los compost evaluados están dentro de los valores exigidos y presentan valores similares a los reportados por Florida *et al.* (2016), Hernández-Nazario *et al.* (2018), Florida & Reategui, (2019), Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020 y Florida *et al.* (2021).

Los porcentajes de N encontrados corresponden a compost de Clase A, según la NCH 2880; estos son valores apropiados y no existen restricciones de uso. El Nitrógeno está involucrado en todos los procesos principales de desarrollo y en la absorción de otros nutrientes (FAO, 2013), su concentración define su potencial para ser usado como una enmienda, por ello, la NCH 2880 exige valores de N total $\geq 0,8 \%$, aunque para la FAO (2013) y la NTC 5167, un compost ideal debe tener $> 1 \%$ de N, en base seca. Los valores encontrados superan estas exigencias y son similares a los de Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020), en compost de residuos sólidos urbanos, en compost a base de otros residuos, como escobajo de palma, residuos de plátano y con pulpa de café (Florida *et al.* 2021); sin embargo, ninguno de estos valores logró alcanzar los $4,8 \%$ de N reportado por Florida & Reategui (2019), en compost de plumas de pollo mezclado con estiércol de vacuno.

Niveles de macronutrientes (P, Ca, Mg y K). La concentración de todos los macronutrientes fue superior a los exigidos por la NCH 2880, por lo que todas las pilas fueron de clase A, de acuerdo con estos indicadores. Los macronutrientes P, Ca, Mg y K no presentaron diferencias significativas, contrariamente, los macronutrientes Ca y K sí presentaron diferencias (Tabla 2).

El P es el segundo macronutriente primario para la planta, involucrado en procesos de transferencia de energía y fotosíntesis (FAO, 2013). La concentración de P es muy importante en el compost; la NTC 5167 considera un compost ideal si el valor medio de P supera 1% , en base seca y la OMS sugiere valores de P, entre $0,30$ a $1,80 \%$. En tal sentido, los resultados cumplen con las normas citadas y presentan valores similares a los compost con base de residuos de pulpa de café (Florida *et al.* 2021) y menores para escobajo de palma, que tiene en promedio $2,13 \%$ de P.

El Ca es un macronutriente secundario y es un componente estructural importante de las células vegetales, relacionada directamente con el crecimiento de la raíz y la calidad de los frutos (FAO, 2013). Además, altas concentraciones de Ca en los suelos se relacionan con un pH neutro, deseable para la mayoría de los cultivos. Es común encontrar deficiencias de Ca en condiciones de suelos ácidos, por ello, es conveniente mantener o mejorar los niveles de este nutriente, a través de la aplicación de enmiendas y controlar elementos tóxicos, como el aluminio (Puri *et al.* 2023). Los valores encontrados son mayores a los reportados por Bárbaro *et al.* (2019); sin embargo, se considera que combinando estos residuos con otros, como los de pulpa de café y escobajo de palma, podrían alcanzar valores de $2,9$ a $3,15 \%$ de Ca (Florida *et al.* 2021).

El Mg encontrado en todas las pilas estuvo dentro de $1,00$ a $1,28 \%$ (Tabla 2), lo cual, corresponde a la clase A, de acuerdo con la NCH 2880. El Mg, es un macronutriente componente básico de la clorofila y está involucrado directamente en el proceso de fotosíntesis, metabolismo de glucídico y activación de enzimas, que intervienen en la síntesis de los ácidos nucleicos y proteínas en la planta (Reyes Alemán *et al.* 2017). Los valores fueron similares a los resultados de Bailón-Rojas & Florida-Rofner (2020) y Florida *et al.* (2021).

En el caso del K, todas las pilas tuvieron un porcentaje de K mayor a 1 (Tabla 2). El K es un macronutriente primario, vital en la síntesis de carbohidratos, proteínas y forma parte de la estructura vegetal; es responsable de la tolerancia a sequías, heladas, salinidad y resistencia al ataque de enfermedades (FAO, 2013). Los valores encontrados para este nutriente son similares a lo reportados por Bailón-Rojas & Florida-Rofner, (2020).

Niveles de cobre y zinc. Los valores medios de Cu y Zn se encuentran dentro del rango de un compost de Clase A, según la NCH 2880 (Tabla 2), son apropiados y no presentan restricciones de uso en la agricultura.

El Cu es un micronutriente requerido en cantidades muy pequeñas, pero importantes para el metabolismo vegetal y animal (FAO,

2013). En el presente proyecto, todos los valores encontrados fueron menores a 70 ppm. Es preciso indicar que el Cu es considerado un metal pesado, beneficioso y necesario para los organismos; sin embargo, pueden ser muy peligrosos por su capacidad de bioacumulación y biomagnificación en los sistemas vivos (Nuñez *et al.* 2023).

El Zn presentó diferencias significativas entre las pilas evaluadas, pero los valores encontrados están dentro del rango de un compost de Clase A, al presentar menos de 200 ppm (Tabla 2). El Zn es un micronutriente requerido en cantidades muy pequeñas, pero importante para el metabolismo vegetal y animal; este elemento también es considerado como metal pesado en su forma elemental, muy peligroso por su capacidad de bioacumulación y biomagnificación en los sistemas vivos (Nuñez *et al.* 2023). Los resultados son similares a los contenidos reportados para compost a base de residuos sólidos orgánicos urbanos (Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020) y a otros residuos compostados (Bohórquez *et al.* 2015; Jacobo Salcedo *et al.* 2017; Alvarez-Vera *et al.* 2019; Florida & Reategui, 2019).

En general, los valores de Cu y Zn se pueden deber a la naturaleza de los residuos compostados o a un adecuado procesamiento, ya que para Wang *et al.* (2021), después de que el compost alcanza la madurez, los niveles de Cu, Zn y otros microelementos, es bajo. Otra razón que explica los valores de Zn y Cu encontrados puede estar relacionada con la adición de microorganismos eficientes, ya que para Lalas *et al.* (2017), la adición de agentes microbianos contribuye a la pasivación de metales pesados, acelerando la degradación y la formación de ácidos húmicos y fúlvicos, este último, con gran capacidad para unirse a los iones metálicos. La inactivación de metales pesados en compost se debe a factores fisicoquímicos, microbianos y componentes orgánicos (Song *et al.* 2021). La combinación de los componentes húmicos y metales pesados, como el Cu y el Zn es fuerte e irreversible, existiendo una correlación positiva para su inmovilización (Cao *et al.* 2021).

Calidad del compost. La tabla 2 muestra el contraste de los indicadores físicos, macronutrientes y micronutrientes, con la NCH 2880 y NTC 5167, para determinar la calidad del compost en las diferentes pilas evaluadas.

Es importante aprovechar este recurso rico en proteínas y en minerales, basado en las propiedades de sus parámetros físicos y químicos (Liao *et al.* 2013); sin embargo, los resultados contrastados con las normas citadas corresponden a compost clase B, que representa a compost de calidad intermedia. Esta determinación se debe a valores elevados de pH, aspecto que compromete el potencial fertilizante de los compost evaluados.

En este contexto, se concluye que los compost con base en residuos sólidos orgánicos urbanos producidos en la Planta Shapajilla, provincia de Leoncio Prado del Perú, tienen niveles adecuados de nutrientes y contenidos bajos en metales pesados; sin embargo, son de calidad B o de calidad intermedia, por sus altos niveles de pH, debido a que el pH es un indicador fundamental que definen

la reactividad y una serie de procesos químicos, que determinan, en gran medida, la calidad del compost (Florida & Reategui, 2019; Bailón-Rojas & Florida-Rofner, 2020). Por lo tanto, es necesario aplicar medidas correctivas a estos compost antes de su procesamiento o aplicación en la agricultura (Bárbaro *et al.* 2019).

Agradecimientos. A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por su colaboración parcial y disposición para la ejecución de la propuesta de investigación. **Financiación:** Este estudio fue financiado parcialmente con recursos del Fondo de Desarrollo Universitario (FEDU), asignados al presupuesto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para promover la Investigación Docente. **Conflictos de intereses:** El artículo fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución autores:** Janyra Grehis Aguirre-Illatopa, Emilio Anthony Ríos-Velasquez y José Dolores Lévano-Crisóstomo realizaron los trabajos de campo, obtención y análisis formal de los datos para la escritura del borrador del manuscrito. Nelino Florida Rofner contribuyó con la asesoría de la investigación, la contextualización, la metodología, revisión y redacción del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final.

REFERENCIAS

- ALVAREZ-VERA, M.; LARGO, A.; IGLESIAS-ABAD, S.; CASTILLO, J. 2019. Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos. *Scientia Agropecuaria*. 10(3):353-361. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.05>
- BAILÓN-ROJAS, M.R.; FLORIDA-ROFNER, N. 2020. Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco. *Enfoque UTE*. 12(1):e644. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.644>
- BÁRBARO, L.; KARLANIAN, M.; RIZZO, P.; RIERA, N. 2019. Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*. 35(2):126-136. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>
- BAZÁN TAPIA, R. 2017. Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. INIA. Lima, Perú. 89p.
- BOHÓRQUEZ, A.; PUENTES, Y.J.; MENJIVAR, J.C. 2015. Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 15(1):73-81. http://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398
- CAO, Y.; WANG, X.; ZHANG, X.; MISSELBROOK, T.; BAI, Z.; MA, L. 2021. An electric field immobilizes heavy metals through promoting

- combination with humic substances during composting. *Bioresource Technology*. 330:124996. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124996>
- CHANG, J.; HSU, T. 2008. Effects of compositions on food waste composting. *Bioresource Technology*. 99(17):8068-8074. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.043>
- DALZELL, H.W.; GRAY, K.R.; BIDDLESTONE, A.J. 1981. Composting in tropical agricultura. Segunda edición. International Institute of Biological Husbandry. 36p.
- FLORIDA ROFNER, N.; LEVANO CRISOSTOMO, J.D.; TRIGOSO BECERRIL, D. 2021. Plumas y residuos locales una alternativa para mejorar la calidad del compost y suelos en el trópico peruano. Editorial Eidec. 64p. <https://doi.org/10.34893/8pf7-7h61>
- FLORIDA ROFNER, N.; REATEGUI DÍAZ, F. 2019. Compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*). *Livestock Research for Rural Development*. 31(1).
- FLORIDA ROFNER, N.; REÁTEGUIDÍAZ, F.; POCOMUCHA POMA, V. 2016. Caracterización del compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*) y otros insumos. *Investigación y Amazonía* 6(2):1-5.
- FLORIDA-ROFNER, N.; LEVANO-CRISOSTOMO, J.D.; JACOBO-SALINAS, S. 2020. Efecto del compost de plumas sobre los indicadores químicos del suelo en una plantación de cacao CCN-51 (*Theobroma cacao* L.). *Producción + Limpia*. 15(1):25-34. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a2>
- GARCÍA CÉSPEDES, D.I.; LIMA CAZORLA, L.; RUÍZ GUTIÉRREZ, L.; CALDERÓN PEÑALVER, P.A. 2014. Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Medio Ambiente y Desarrollo*. 14(26).
- GARCÍA-RAMOS, C.; AROZARENA-DAZA, N.J.; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, F.; HERNÁNDEZ-GUILLÉN, M.; PASCUAL-AMARO, J.Á.; SANTANA-GATO, D. 2019. Obtención de compost mediante la biotransformación de residuos de mercados agropecuarios. *Cultivos Tropicales*. 40(2):e02.
- HERNÁNDEZ-NAZARIO, L.; BENÍTEZ-FONSECA, M.; BERMÚDEZ-TORRES, J.M. 2018. Physical-chemical characterization of the organic fraction of urban solid waste from the controlled landfill at the Abel Santamaría Urban Center in Santiago de Cuba. *Tecnología Química*. 38(2):369-379
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN NORMA, ICONTEC. 2011. Norma técnica colombiana 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Segunda actualización. ICONTEC. Colombia. 10p.
- INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD, INACAL. 2021. Norma Técnica Peruana NTP 201.207:2020. Fertilizantes. Compost para uso agrícola. Requisitos. 1ª edición. 21p.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA, INEI. 2022. Perú: proyecciones de población total según departamento, provincia y distrito, 2018-2022. INEI. Lima, Perú. 124p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, INN. 2004. Norma oficial chilena 2880 (NCH 2880). Norma Chilena de Calidad de Compost. INN. Chile. 27p.
- IÑIGUEZ, G.; PARRA, J.; VELASCO, P. 2006. Utilización de subproductos de la industria tequilera. parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante el compostaje. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 22(2):83-93.
- JACOBO SALCEDO, M.D.R.; FIGUEROA VIRAMONTES, U.; MACIEL TORRES, S.P.; LÓPEZ ROMERO, L.L.; MUÑOZ VILLALOBOS, A. 2017. Elementos menores en composta producida a partir de estiércol de engorda y rastrojo de maíz. *Agrofaz*. 17(02):61-71.
- JARAMILLO, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia. 619p.
- LALAS, S.; ATHANASIADIS, V.; DOURTOGLOU, V.G. 2017. Humic and fulvic acids as potentially toxic metal reducing agents in water. *CLEAN—Soil, Air, Water*. 46(2):e1700608. <https://doi.org/10.1002/clen.201700608>
- LIAO, Q.; HUANG, D.; JIANG, Z. 2013. Estimation of production amount of livestock and poultry manure and environmental impact assessment in Guangxi. *Asian Agricultural Research*. 5:93-96.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, MINAM. 2018. Resolución ministerial N° 457-2018-MINAM por el cual establece la Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales. Disponible desde Internet en: <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/guia-caracterizacion-rrss.pdf>
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, MINAM. 2019. Informe nacional sobre el estado del ambiente. Disponible desde Internet en: https://sinia.minam.gob.pe/inea/wp-content/uploads/2021/07/INEA-2014-2019_red.pdf
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, MINAM. 2021. Estadística ambiental. Sistema Nacional de Información Ambiental-SINIA. Disponible desde Internet en: <https://sinia.minam.gob.pe/informacion/tematicas?tematica=08>

- NUÑEZ, W.E.; SOTOMAYOR, D.A.; BALLARDO, C.V.; HERRERA, E. 2023. Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales. *Scientia Agropecuaria*. 14(1):79-91. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.008>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2013. Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina Oficina Regional para América Latina y el Caribe Santiago de Chile. Disponible desde Internet en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- PERALTA-ANTONIO, N.; DE FREITAS, G.B.; WATTHIER, M.; SILVA, R. 2019. Compost, bokashi y microorganismos eficientes: sus beneficios en cultivos sucesivos de brócolis. *Idesia*. 37(2):59-66. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000200059>
- PURI, E.E.; ROFNER, N.F.; NAVARRO VÁSQUEZ, L. 2023. Impact of *Erythroxylum* coca cultivation on soil quality in the Aguaytia valley. *Soil Environmental*. 42(1):65-76. <http://dx.doi.org/10.25252/SE/2023/243041>
- RAMOS AGÜERO, D.; TERRY ALFONSO, E. 2014. Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*. 35(04):52-59.
- RAWAT, M.; RAMANATHAN, AL.; KURIAKOSE, L. 2013. Characterization of Municipal Solid Waste Compost (MSWC) from Selected Indian Cities—A Case Study for Its Sustainable Utilization. *Journal of Environmental Protection*. 4:163-171. <http://doi.org/10.4236/jep.2013.42019>
- REYES ALEMÁN, M.D.R.; FRANCO MORA, O.; MORALES ROSALES, E.J.; PÉREZ LÓPEZ, D.D.J. 2017. Influencia del magnesio y zinc en la altura de planta y verdor de hojas en *Lilium*. *Investigación y Ciencia*. 25(70):31-37.
- RÍOS-VELASQUEZ, E.A.; FLORIDA-ROFNER, N.; LAMA-ISMINIO, D.A. 2023. Caracterización de compost de residuos sólidos orgánicos urbanos de seis distritos de la provincia Leoncio Prado, Perú. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 26(1):e2371. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2371>
- RIVAS-NICHORZON, M.; SILVA-ACUÑA, 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.
- ROSAL, A.; PÉREZ, J.P.; ARCOS, M.A.; DIOS, M. 2007. La incidencia de metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos y en su uso agronómico en España. *Información tecnológica*. 18(6):75-82. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000600010>
- SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A.; ROIG, A.; PAREDES, C.; BERNAL M.P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*. 78(3):301-308. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00031-1)
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ, SENAMHI. 2021. Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional. Disponible desde Internet en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos30>
- SHARMA, A.; SAHA, T.N.; ARORA, A.; SHAH, R.; NAIN, L. 2017. Efficient microorganism compost benefits plant growth and improves soil health in calendula and marigold. *Horticultural Plant Journal*. 3(2):67-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hpj.2017.07.003>
- SONG, C.; ZHAO, Y.; PAN, D.; WANG, S.; WU, D.; WANG, L.; HAO, J.; WEI, Z. 2021. Heavy metals passivation driven by the interaction of organic fractions and functional bacteria during biochar/montmorillonite-amended composting. *Bioresource Technology*. 329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124923>
- WALKLEY, A.J.; BLACK, I.A. 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37:29-38.
- WANG, L.; LIU, H.; PRASHER, S.O.; OU, Y.; YAN, B.; ZHONG, R. 2021. Effect of inorganic additives (rock phosphate, PR and boron waste, BW) on the passivation of Cu, Zn during pig manure composting. *Journal of Environmental Management*. 285:112101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112101>