Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Sistema de compostaje Johnson-Su como estrategia de gestión sustentable de residuos orgánicos en zonas forestales

Johnson-Su composting system as a sustainable organic waste management strategy in forested ecosystems

Nájera-Luna, J.A.[1]*, Esquivel-Delgado, T.V.[1], Díaz-Ramírez, B.[1], Méndez-González, J.[2], Meza-López, P.[1], Rascón-Solano, J.[3], Luna-Robles, E.O.[1]

[1] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto (TecNM-ITES). Calle Tecnológico No. 101. Colonia La Forestal, C.P. 34942. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3989-3323*, https://orcid.org/0009-0006-7510-0331, https://orcid.org/0009-0006-3768-5746, https://orcid.org/0000-0003-4963-0874, https://orcid.org/0000-0001-5133-0403

[2] Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Calzada Antonio Narro 1923, C.P. 25315 Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. ORCID. https://orcid.org/0000-0002-6971-5018.

[3] Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias-Rosales, Campus Delicias, CP. 33000. Delicias, Chihuahua, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2541-4176.

juan.nl@salto.tecnm.mx*; violetaesquivel759@gmail.com; beatriz.dr@salto.tecnm.mx; jmendezg@hotmail.com; pettermezza@itelsalto.edu.mx; jsolano@uach.mx; eranroka@hotmail.com

Innovación Tecnológica: Estrategia para la gestión sustentable de residuos orgánicos.
Aplicación empresarial: Sistemas de compostaje pasivo.

Recibido: 13 enero 2026
Aceptado: 09 junio 2026

Abstract

The increasing accumulation of organic solid waste represents an environmental and social threat on a global scale due to its contribution to greenhouse gas emissions, pollution, and the loss of recoverable resources. This study evaluated four composting bioreactor configurations based on the Johnson-Su system, installed at the Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, to process domestic and agroforestry organic residues generated in the region. Temperature, moisture, and pH were monitored for six months. At the end of the process, the resulting materials were chemically characterized, and the applicable parameters were compared with the values established in the NMX-AA-180-SCFI-2018 standard. The results showed high organic matter and nutrient contents; however, differences among configurations were also identified in variables associated with salinity, sodicity and nitrogen conservation. The bioreactor R3 showed the most balanced chemical profile among the evaluated configurations. Overall, these bioreactors may contribute to the

regional valorization of organic waste, provided that the resulting materials are applied as organic amendments at controlled rates and under appropriate technical criteria.

Keywords: Agroforestry residue valorization, passive aeration, nutrient recovery, salinity, sodicity.

Resumen

La creciente acumulación de residuos sólidos orgánicos representa una amenaza ambiental y social a escala global debido a su contribución como emisores de gases de efecto invernadero, contaminación y pérdida de recursos aprovechables. El presente estudio evaluó exploratoriamente cuatro configuraciones de biorreactores de compostaje basadas en el sistema Johnson-Su, instaladas en el Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, para procesar residuos orgánicos domésticos y agroforestales generados en la región. Se monitorearon la temperatura, la humedad y el pH durante seis meses. Al final del proceso, los materiales obtenidos se caracterizaron químicamente y los parámetros aplicables se compararon con los valores establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018. Los resultados mostraron contenidos elevados de materia orgánica y nutrientes; sin embargo, también se identificaron diferencias entre configuraciones en variables asociadas con salinidad, sodicidad y conservación del nitrógeno. El biorreactor R3 presentó el perfil químico más equilibrado entre las modalidades evaluadas. En conjunto, estos biorreactores pueden contribuir al aprovechamiento regional de residuos orgánicos, siempre que los materiales obtenidos se utilicen como enmiendas orgánicas en dosis controladas y bajo criterios técnicos de aplicación.

Palabras clave: Aprovechamiento de residuos agroforestales, aireación pasiva, recuperación de nutrientes, salinidad, sodicidad.

1. Introducción

En los últimos años la creciente acumulación de residuos sólidos a nivel global se considera una amenaza crítica para la integridad de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades [1], por lo que esta situación lejos de disminuir se ha estado intensificando de forma alarmante, ya que de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [2], se prevé que la generación de residuos sólidos aumente de 2,100 millones de toneladas en el año 2023 a 3,800 en el año 2050.

Dentro de esta problemática, los residuos orgánicos representan cerca de la mitad de los desechos y cuando son gestionados de manera inadecuada contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, malos olores, contaminación de suelo y agua [3]; por lo que es necesario implementar estrategias sostenibles que permitan reducirlos en cantidad y al mismo tiempo, aprovecharlos de manera eficiente [4].

Existen diversas técnicas que permitan reducir, transformar y valorizar los residuos orgánicos en enmiendas para el suelo y convertir este problema ambiental en una oportunidad sostenible [5].

Dentro de esas técnicas, el compostaje surge como una alternativa sostenible para el manejo y aprovechamiento de los residuos orgánicos, dado que este proceso reduce significativamente su volumen y evita la

generación de metano asociado a la descomposición anaeróbica [6].

En este contexto, han surgido múltiples sistemas de compostaje y procedimientos de biodegradación diseñados para acelerar la transformación de los desechos orgánicos y obtener un producto final de alta calidad [7].

Uno de estos sistemas es el compostaje Johnson-Su, su diseño innovador opera sin volteos periódicos porque mantiene conductos de aireación pasiva, lo cual contribuye a evitar malos olores y conservar condiciones aeróbicas favorables para la actividad de los microorganismos involucrados en la descomposición [8].

La descomposición controlada de la materia orgánica produce un material que puede contribuir a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incrementar su capacidad de retención de humedad, favorecer la estabilidad estructural y aportar nutrientes para las plantas [9].

Además, este tipo de compostaje se integra dentro de un modelo de economía circular, el cual busca cerrar ciclos biogeoquímicos mediante la incorporación de los residuos al sistema productivo, promoviendo el aprovechamiento eficiente de los recursos con una disminución del impacto ambiental [10].

En la región forestal de El Salto, Durango, se generan residuos orgánicos provenientes de las actividades industriales, agropecuarias y domésticas cuyo destino final generalmente es el relleno sanitario o la incineración [11]; sin embargo, una proporción de estos residuos pueden canalizarse a procesos de compostaje para disminuir su disposición final y recuperar nutrientes.

El objetivo del estudio fue evaluar el desempeño de cuatro configuraciones de biorreactores de compostaje tipo Johnson-Su para el aprovechamiento de residuos orgánicos domésticos y agroforestales generados en la región de El Salto, Durango, mediante el monitoreo de temperatura, humedad y pH durante seis meses, así como la caracterización química del material obtenido y la comparación de los parámetros aplicables con los valores establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El trabajo se realizó en el vivero del Instituto Tecnológico de El Salto (ITES), localizado en la calle Tecnológico No. 101, Colonia La Forestal, C.P. 34942, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, en el sistema montañoso denominado Sierra Madre Occidental, cuya vegetación principal está compuesta por bosques de coníferas, presenta un clima predominantemente templado subhúmedo, con lluvias concentradas en verano. La precipitación media anual es cercana a 1 200 mm, principalmente entre junio y septiembre. Debido a su ubicación en la Sierra Madre Occidental y a su elevada altitud, la región presenta inviernos fríos, heladas frecuentes y nevadas ocasionales [12].

2.2. Diseño y construcción de los biorreactores

Se instalaron cuatro biorreactores verticales de compostaje Johnson-Su construidos de malla alambrada electrosoldada de 6x6 pulgadas, calibre 4, para crear la jaula o contenedor. El interior se forró con tela malla sombra al 95% y se sujetó con alambre recocido para mantener la estabilidad de la estructura. Cada estructura tuvo 100 cm de diámetro y 150 cm de alto con una capacidad aproximada de un metro cúbico. En su construcción se usaron materiales reciclados, recuperados o reacondicionados cuando fue posible conforme a los principios de la economía circular (Figura 1).

El primer biorreactor (R1) consideró la configuración de referencia porque reprodujo el diseño convencional descrito por Johnson y DeSimio [13]: una estructura montada sobre una tarima de madera sobre la cual va apoyada en una base de triplay con seis orificios de 4 pulgadas donde se insertan seis tubos de PVC de 2.0 metros de longitud, uno central y cinco distribuidos concéntricamente a 72°. Después del llenado, los tubos se retiran para formar conductos internos de aireación pasiva. Para reducir la pérdida de humedad periférica, el biorreactor (R2) incorporó una modificación, donde solo se agregó una capa de cartón de 2 cm en el interior de la malla. Por lo demás, mantuvo el diseño y la operatividad pasiva del R1.

El biorreactor R3 incluyó la capa de cartón del R2 y presentó dos modificaciones clave: 1) se instaló en contacto directo con el suelo, eliminando la tarima y la base de triplay, y 2) el sistema de aireación se simplificó a un solo tubo de PVC de 4 pulgadas en el centro. La operación se mantuvo pasiva.

El biorreactor R4 mantuvo la capa de cartón y el contacto directo con el suelo, pero no incluyó conductos internos de aireación. En su lugar, se aplicó un protocolo de volteo manual progresivamente menos frecuente: de tres a cuatro volteos durante la primera semana a un volteo a partir de la sexta semana. Por esta razón, R4 se interpretó como una variante comparativa con aireación mecánica y no como un biorreactor Johnson-Su convencional (Tabla 1). El monitoreo se realizó de junio a diciembre de 2025.

Tabla 1. Configuraciones comparativas de los biorreactores evaluados.

Configuración	Referencia Johnson-Su	Tarima y base	Cartón interior	Conductos de aireación	Contacto con suelo	Manejo
R1	Sí	Sí	No	Seis	No	Pasivo
R2	No	Sí	Sí	Seis	No	Pasivo
R3	No	No	Sí	Uno central	Sí	Pasivo
R4	No	No	Sí	Ninguno	Sí	Volteo manual



Figura 1. Elaboración de biorreactores.

2.3. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos

Para conocer el comportamiento térmico del proceso de compostaje por biorreactor, se monitoreó la temperatura; mientras que la humedad y el pH se midieron como control del proceso, las mediciones de estas variables se realizaron utilizando un medidor digital portátil de suelo con doble sonda (YIERYI, modelo SGS07, Shenzhen, China) que previamente fue contrastado con métodos de laboratorio mediante equipos calibrados y que se utilizó como medio comparativo entre los biorreactores evaluados. Las lecturas de temperatura, humedad y pH se obtuvieron cada tercer día en cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste) y tres alturas (30, 60 y 90 cm), para un máximo de doce lecturas por biorreactor en cada fecha (Figura 2). Esta frecuencia se seleccionó para caracterizar la tendencia general del proceso durante seis meses y reducir la perturbación física ocasionada por la inserción repetida del instrumento. Debido a que no se realizaron mediciones en distintos horarios del día, los resultados describen tendencias temporales generales y no variaciones diurnas.



Figura 2. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos.

2.4. Composición de la mezcla orgánica

El material orgánico utilizado se recolectó dentro del ITES y en la región de El Salto, Durango. La mezcla se integró con materiales verdes considerados fuentes predominantes de nitrógeno y materiales marrones asociados con un mayor aporte de carbono. Los materiales verdes incluyeron estiércol de caballo, residuos de frutas y verduras y pasto recién cortado; los materiales marrones incluyeron aserrín degradado, hojarasca y podas secas. La relación C:N se estimó teóricamente a partir de valores de referencia reportados para materiales similares para ajustarla en una proporción entre 20:1 y 40:1 en función al peso y volumen de los materiales [14]. La humedad se mantuvo entre 60 y 70 % mediante la adición controlada de agua cuando fue necesario. De tal forma que por cada 100 kg de mezcla fresca se incorporaron aproximadamente 30 kg de estiércol de caballo, 13 kg de residuos de frutas y verduras, 13 kg de pasto recién cortado, 8 kg de aserrín degradado, 26 kg de hojarasca seca y 10 kg de podas secas trituradas.

2.5. Muestreo y análisis químico final

Después de seis meses de compostaje, se recolectó una muestra de material por cada biorreactor a partir de cinco submuestras de diferentes posiciones y profundidades que se mezclaron aplicando un cuarteo y separando una muestra final de aproximadamente 1 kg que se guardó en una bolsa hermética etiquetada para su envío al Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Planta de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Los parámetros analizados se compararon únicamente con los criterios aplicables de la NMX-AA-180-SCFI-2018 [15]. Los resultados corresponden a una muestra compuesta representativa por cada biorreactor; por lo tanto, se presentan descriptivamente y no incluyen desviación estándar al no contar con réplicas de cada biorreactor.

2.6. Análisis de datos

Con la información registrada de la temperatura, se organizó en una base de datos en Microsoft Excel para elaborar la gráfica de desempeño térmico del proceso de compostaje y determinar la variación de la actividad microbiana durante el periodo de monitoreo.

3. Resultados y discusión

3.1. Comportamiento de la temperatura

Durante las primeras semanas de operación, los biorreactores presentaron un incremento rápido de la temperatura y superaron los 50 °C. Este comportamiento es consistente con una fase termófila asociada con una mayor actividad microbiana y con la degradación de compuestos fácilmente biodegradables [16, 17] (Figura 3).

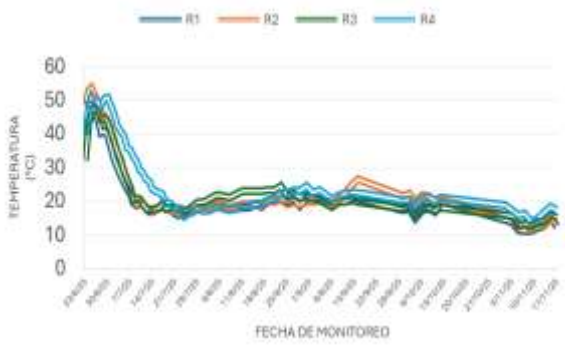


Figura 3. Evolución temporal de la temperatura interna de los biorreactores.

En esta etapa, R4 (variante con volteo semanal) y R2 (configuración pasiva con cartón interior) mostraron los picos térmicos más altos. Las diferencias observadas podrían relacionarse con la aireación, la retención de humedad, el contacto con el suelo y el manejo aplicado. En contraste R1, a pesar de contar con un sistema de aireación pasiva más elaborado (seis tubos de PVC y base perforada), presentó un pico térmico ligeramente menor, lo que puede relacionarse con una aireación más homogénea y menos disruptiva, que evitó sobreoxigenaciones puntuales y al mismo tiempo permitió una degradación más gradual. R3, con un solo conducto central y contacto directo con el suelo, mostró un ascenso más moderado. Estos patrones sugieren que la configuración estructural puede modificar la evolución térmica, aunque no permiten establecer relaciones causales concluyentes.

Después del pico inicial, las temperaturas descendieron y convergieron gradualmente hacia un intervalo aproximado de 15 a 25 °C, compatible con una etapa mesófila prolongada. R4 y R2 mantuvieron valores ligeramente superiores durante parte del seguimiento, lo que sugiere que el volteo mecánico y la entrada central de aire permitieron sostener la actividad microbiana por más tiempo.

En contraste, R3 y especialmente R1 mostraron temperaturas algo más bajas y estables durante parte del periodo de seguimiento. Esta respuesta podría asociarse con diferencias en el contacto con el suelo, la conservación de humedad y la aireación pasiva.

Hacia el final del monitoreo, los cuatro biorreactores presentaron una tendencia descendente y convergente, con temperaturas próximas a las condiciones ambientales. Este comportamiento es consistente con una etapa de estabilización o maduración, en la cual disminuye la disponibilidad de sustratos fácilmente degradables y predomina la transformación gradual de compuestos más recalcitrantes [17].

Aunque R4 mantuvo temperaturas ligeramente mayores durante parte del proceso, este patrón no se asoció de manera uniforme con concentraciones superiores de nutrientes. R1 presentó los mayores valores de materia orgánica y potasio total; R2 registró el contenido más alto de nitrógeno; y R4 mostró el mayor valor de fósforo. En consecuencia,

no se observó una fertilidad global superior atribuible a una sola configuración de los biorreactores. Los resultados sugieren perfiles químicos diferenciados que deben interpretarse de acuerdo con las propiedades del material y las necesidades del suelo [16].

3.2. Caracterización química final de los materiales compostados

Los resultados de laboratorio de las cuatro configuraciones de biorreactores Johnson-Su (R1, R2, R3, y R4) se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades químicas generales de los materiales compostados.

Parámetro	Unidad	R1	R2	R3	R4
Materia orgánica	%	52	48	49	51
Nitrógeno total		1.20	2.80	2.10	0.98
Fósforo		3.60	3.71	3.01	3.81
Potasio		3.54	2.14	2.15	1.10
pH	-	8.13	7.99	7.74	8.45
Conductividad eléctrica	dS m^{-1}	2.84	2.57	2.31	2.78
RAS	-	12.32	14.91	4.90	3.17
Micronutrientes disponibles en los materiales compostados					
Fe	ppm	350	190	180	240
Zn		80	10	50	10
Cu		150	90	70	10
Mn		160	70	120	160
Sales solubles determinadas en los materiales compostados					
Ca^{2+}	meq L^{-1}	1.01	0.99	0.78	1.08
Mg^{2+}		2.06	1.40	1.48	1.15
Na^{+}		15.26	16.30	5.22	3.35
K^{+}		30.97	20.13	19.51	22.33
CO_3^{2-}		0.00	0.00	0.00	0.00
HCO_3^{-}		1.08	0.72	1.26	0.90
Cl^{-}		7.92	13.20	13.20	17.60
SO_4^{2-}		40.30	24.90	12.54	9.41

Los materiales obtenidos presentaron concentraciones elevadas de materia orgánica y nutrientes, lo que sugiere un potencial aprovechamiento agronómico. En particular, el contenido de materia orgánica varió entre 48 y 52 %, indicando una proporción considerable de compuestos orgánicos. Sin embargo, su aplicación debe definirse técnicamente, considerando de manera conjunta los indicadores de estabilidad y madurez, así como los posibles riesgos asociados con desbalances nutrimentales, sales solubles o sodio, antes de establecer el uso final del material [16].

El nitrógeno presentó variación entre configuraciones: R2 y R3 registraron los valores más altos (2.80 y 2.10 %), mientras que R1 y R4 mostraron concentraciones de 1.20 y 0.98 %. Estas diferencias podrían asociarse con la composición inicial de los materiales, la aireación y las pérdidas de nitrógeno durante el proceso [18].

Los valores observados sugieren que R2 y R3 tienen un mayor aporte potencial de nitrógeno; no obstante, su aplicación directa debe evitarse hasta definir dosis compatibles con el suelo y el cultivo.

El fósforo total fue elevado y relativamente homogéneo en los cuatro biorreactores (3.01 a 3.81 %), lo que confirma que este nutriente no es limitante. Sin embargo, la literatura advierte que concentraciones altas de fósforo en compostas pueden conducir a acumulación excesiva en el suelo y aumentar el riesgo de pérdidas por escorrentía, especialmente cuando se aplican de manera repetida [19].

El potasio, tanto total como soluble, presentó valores particularmente altos, destacando R1 por su elevada concentración y aunque es uno de los elementos más móviles y fácilmente liberables durante la descomposición de residuos orgánicos, su acumulación en biorreactores es esperable [20]. Si bien esto representa una ventaja para cultivos con alta demanda potásica, también contribuye de manera importante al incremento de la conductividad eléctrica del material.

Los micronutrientes disponibles (Fe, Zn, Cu y Mn) alcanzaron concentraciones muy elevadas en todos los biorreactores, particularmente en R1, donde Zn, Cu y Mn superaron ampliamente los rangos típicos de suelos agrícolas. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en compostas concentradas, debido a la capacidad de la materia orgánica para retener metales [21].

Aunque las concentraciones registradas no permiten inferir por sí solas un riesgo inmediato, su aplicación debe realizarse de manera controlada. El uso reiterado o en dosis excesivas podría favorecer la acumulación progresiva de algunos elementos traza en el suelo, generar desequilibrios nutrimentales o afectar la disponibilidad de otros nutrientes debido a interacciones antagónicas entre iones. Por ello, estos materiales deben emplearse como enmiendas orgánicas dosificadas y mezcladas con el suelo, considerando previamente las características fisicoquímicas de la composta, los requerimientos del cultivo y el análisis de fertilidad del suelo receptor, en lugar de utilizarse directamente como sustratos únicos de cultivo [22]. En este estudio, el término enmienda orgánica concentrada se refiere a un material con contenidos elevados de materia orgánica, nutrientes y sales solubles que no debe utilizarse como sustrato único de cultivo. Su uso requiere mezclarse con suelo, composta madura u otros sustratos, o aplicarse en dosis controladas y fraccionadas.

El pH de los biorreactores fue consistentemente alcalino (7.74 a 8.45), lo que indica una alta saturación de bases y un estado avanzado de descomposición de compuestos orgánicos ácidos. Valores de pH elevados en compostas suelen asociarse con la presencia de amonio, carbonatos y cationes básicos liberados durante la mineralización [16].

La conductividad eléctrica osciló entre 2.31 y 2.84 dS m^{-1}, lo que indica una concentración apreciable de sales solubles. Aunque la interpretación depende del método analítico y de la proporción aplicada al suelo, estos valores justifican un uso controlado, especialmente en cultivos sensibles a la salinidad. En consecuencia, los materiales deben utilizarse como enmiendas orgánicas dosificadas o incorporarse a mezclas de sustratos, en lugar de emplearse directamente como único medio de cultivo. Gondek et al. [23], señalan valores de CE elevada en compostas a partir de 5 dS m^{-1}.

Un aspecto muy importante que se identificó en los biorreactores evaluados fue la sodicidad, particularmente en R1 y R2, cuyos valores de RAS (12.32 y 14.91, respectivamente) indican un riesgo elevado debido a la alta concentración de sodio intercambiable que puede afectar negativamente la estructura del suelo, reducir la agregación y disminuir la conductividad hidráulica cuando estos materiales se aplican de forma continua [24].

En contraste, R3 y R4 presentaron valores de RAS bajos a moderados, lo que sugiere una mayor estabilidad química y menor riesgo de degradación estructural del suelo. Este resultado indica que no todos los biorreactores presentan el mismo nivel de riesgo y que su calidad depende fuertemente del manejo y de los insumos utilizados.

En conjunto, los resultados confirman que los productos obtenidos de los biorreactores evaluados no deben considerarse como sustratos finales, sino insumos orgánicos concentrados, cuyo principal valor radica en su capacidad para enriquecer otros sistemas edáficos. Existe coincidencia en que la aplicación de compostas concentradas debe realizarse mediante mezclas, diluciones o aplicaciones fraccionadas, a fin de maximizar beneficios y minimizar riesgos ambientales [25].

Las modalidades de biorreactores R3 y R4 presentan una alta fertilidad potencial, reflejada en su elevado contenido de materia orgánica, macronutrientes y micronutrientes que les confiere un comportamiento químico más equilibrado; sin embargo, los biorreactores R1 y R2, muestran limitaciones químicas importantes, particularmente asociadas a salinidad, alcalinidad y sodicidad, por lo que requieren de un manejo más cuidadoso antes de su aplicación.

Relación del compostaje con la NMX-AA-180-SCFI-2018

Los resultados del análisis de laboratorio de las muestras de composta de los biorreactores R1, R2, R3 y R4 evidencian en términos generales que el producto obtenido presenta características compatibles con los criterios de calidad establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018 para composta, particularmente en lo referente a pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica. Sin embargo, se identificaron diferencias relevantes entre muestras que influyen en su potencial de uso.

El contenido de materia orgánica (MO) fue elevado en todas las muestras (48 a 52 %), superando ampliamente el valor mínimo del 20% establecido por la norma. Estos valores indican un adecuado grado de estabilización de la fracción orgánica y un alto potencial como mejorador de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

En cuanto al pH, los valores obtenidos (7.74 a 8.45) se ubicaron dentro del intervalo permisible (6.7 a 8.5). Este comportamiento es característico de compostas con predominio de residuos orgánicos lignocelulósicos y procesos avanzados de humificación, donde la mineralización de compuestos orgánicos ácidos y la acumulación de cationes básicos tienden a estabilizar el pH hacia valores neutros o ligeramente alcalinos [26]. No obstante, el valor observado en R4 (pH 8.45) se encuentra en el límite superior del rango normativo, lo que podría condicionar la disponibilidad de algunos micronutrientes en suelos alcalinos.

La conductividad eléctrica (CE) de los materiales osciló entre 2.31 y 2.84 dS m^{-1}. Estos valores son inferiores al límite establecido por la NMX-AA-180-SCFI-2018 para composta; sin embargo, su aplicación debe definirse con cautela, especialmente en cultivos sensibles a sales. La conductividad eléctrica es un indicador de la concentración de sales solubles en el compost y constituye un criterio importante para evaluar su calidad y posible efecto sobre los cultivos.

Respecto al nitrógeno total, se observaron diferencias marcadas entre muestras. R1, R2 y R3 presentaron concentraciones entre 1.20 y 2.80 %, cumpliendo con el valor mínimo de 1% recomendado por la NMX-AA-180-SCFI-2018 y evidenciando un buen potencial como fuente de nitrógeno orgánico de liberación

gradual. En contraste, la muestra R4 registró un valor de 0.98%, ligeramente inferior al umbral normativo, lo que sugiere un proceso de compostaje menos eficiente en términos de conservación de nitrógeno, posiblemente asociado a pérdidas por volatilización de amoníaco debido a los volteos mecánicos que se realizaron en este biorreactor.

Un aspecto crítico identificado fue el contenido de sodio y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS). Las muestras R1 y R2 presentaron valores elevados de Na^+ (≥15 meq L^{-1}) y RAS superiores a 12, lo que representa un riesgo potencial de sodicidad al ser aplicadas de forma continua o en altas dosis. Aunque la NMX-AA-180-SCFI-2018 no establece límites estrictos para sodio o RAS, diversos autores señalan que compostas con alta sodicidad pueden afectar la estabilidad estructural del suelo, reducir la infiltración y limitar la absorción nutrimental por las plantas [24]. En contraste, R3 y R4 mostraron valores de RAS bajos (<5), indicando una mejor compatibilidad con suelos agrícolas.

Los macronutrientes fósforo y potasio presentaron concentraciones elevadas en todas las muestras, lo que incrementa su valor como enmienda fertilizante. Asimismo, los micronutrientes (Fe, Zn, Cu y Mn) se encontraron en concentraciones elevadas, particularmente en R1. Aunque estos elementos pueden contribuir a corregir deficiencias nutricionales del suelo, aplicaciones continuas o en dosis excesivas pueden favorecer su acumulación progresiva y alterar la disponibilidad de otros nutrientes, especialmente en condiciones de pH alcalino y alto contenido de materia orgánica [21]. Diversos estudios sobre compostas han señalado la importancia de monitorear la concentración de micronutrientes y metales traza para garantizar un uso agronómico seguro y sostenible [16, 27].

En conjunto, los resultados indican que R3 representa la muestra con mejor equilibrio químico, cumpliendo con los criterios normativos y mostrando menor riesgo agronómico. R1 y R2 cumplen con la NMX-AA-180-SCFI-2018, pero requieren manejo cuidadoso debido a su sodicidad elevada, mientras que R4 necesita ajustes en el proceso para incrementar su contenido de nitrógeno y consolidar su importancia como composta de calidad.

4. Conclusiones

Las cuatro configuraciones evaluadas permitieron transformar residuos orgánicos domésticos y agroforestales en materiales con contenidos elevados de materia orgánica y nutrientes. Las diferencias observadas entre modalidades sugieren que la configuración y el manejo de los biorreactores pueden asociarse con variaciones en el comportamiento térmico y en las propiedades químicas finales. Los valores de materia orgánica, pH y conductividad eléctrica se ubicaron dentro de los intervalos aplicables considerados en la NMX-AA-180-SCFI-2018; sin embargo, los valores elevados de sodio y RAS observados en R1 y R2 indican la necesidad de aplicar estos materiales en dosis controladas. Entre las configuraciones analizadas, R3 presentó el perfil químico más equilibrado. Estos resultados muestran que el sistema puede contribuir al aprovechamiento regional de residuos orgánicos, siempre que su operación y la aplicación del material se realicen con criterios técnicos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el financiamiento al proyecto con clave 21548-25P: “Evaluación combinada de los sistemas de compostaje y cultivo: biorreactor Johnson-Su y Hügelkultur como estrategia de apoyo para la producción de alimentos de autoconsumo y reducción de residuos

orgánicos en zonas templadas" del cual se originó este escrito. De igual forma, de manera especial a los revisores anónimos del manuscrito que aportaron valiosas sugerencias a este trabajo.

6. Referencias

1. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (07 de junio de 2024). *Problemática de los residuos y los malos hábitos.* https://www.gob.mx/semarnat/articulos/problematica-de-la-basura-y-malos-habitos?idiom=es.
2. United Nations Environment Programme (2024). Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste-Turning rubbish into a resource. Nairobi. https://wedocs.unep.org/rest/api/core/bitstreams/daa56f4d-2479-4e10-88c6-4d65da463299/content
3. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.
4. Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M., & Nicolescu, C. M. (2024). Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: Current practices and potential improvements. *Sustainability*, *16*(15), 6329. https://doi.org/10.3390/su16156329
5. Vargas Pineda, O. I., Trujillo González, J. M., & Torres Mora, M. A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia*, *23*(2):123-129. https://doi.org/10.22579/20112629.575
6. U.S. Environmental Protection Agency. (01 December 2025). *Composting.* https://www.epa.gov/sustainable-management-food/composting
7. Oviedo Ocaña, E. R., Marmolejo Rebellon, L. F. & Torres Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *Ingeniería, investigación y tecnología*, *18*(1):31-42. https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v18n1/1405-7743-iit-18-01-00031.pdf
8. Connolly, E. E. (2024). *The New Earth Project: Youth-powered climate solutions through food waste reduction. CART*. Retrieved from https://www.fws.gov/project/nature-based-solutions-new-earth-project-pilot.
9. Delgado Arroyo, M. D. M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., & 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), 965-977. https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15
10. Ellen MacArthur Foundation. (30 November 2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition
11. Medrano-Guerrero, J. E., Meza-López, P., Hernández, F. J., & Nájera-Luna, J. A. (2022). Cuantificación y caracterización de los residuos del proceso de aserrío en una fábrica de tarimas en El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, e3599,

https://doi.org/10.33064/iycuaa2022863599

12. INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). (2022). *Aspectos geográficos de Durango. Compendio 2022*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463913276.pdf
13. Johnson, D., & DeSimio, P. (2017). *Best management practices: Johnson-Su composting bioreactors.* New Mexico State University College of Agriculture, Consumer, & Environmental Sciences. https://regenerationinternational.org/wp-content/uploads/2017/09/Johnson-Su-Bioreactor.pdf
14. Amlinger, F., Peyr, S., Hildebrandt, U., Müsken, J., Cuhls, C., & Clemens, J. (2009). *The State of the Art of Composting–A guide to good practice.* Austrian Ministry for Agriculture and Forestry. Environment and Water Management.
15. SE (Secretaría de Economía). (2018). *Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales* (NMX-AA-180-SCFI-2018). Diario Oficial de la Federación. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf
16. Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, *100*(22), 5444-5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027
17. Iglesias Jiménez, I., Barral Silva, M. T., & Marhuenda Egea, F. C. (2008). 11 indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En J. Moreno Casco y R. Moral herrero (Eds.). *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa.
18. Sharma, B., Vaish, B., Monika, Singh, U. K., Singh, P., & Singh, R. P. (2019). Recycling of organic wastes in agriculture: an environmental perspective. *International journal of environmental research*, *13*(2), 409-429. https://doi.org/10.1007/s41742-019-00175-y
19. Fernández-Marcos, M. L. (2011). Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. En: M. E. López Mosquera, M. J. Sainz Osés (coordinadoras). *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, Universidad de Santiago de Compostela, (25-31).
20. Rynk, R., Van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. J., Gouin, F. R., Laliberty, L., Kay, D., Murphy, D. W., Hoitink, H. A., & Brinton, W. F. (1992). *On-farm composting handbook.* Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES) 54. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension. College of Agriculture and Life Sciences (CALS). Cornell University.
21. Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer Science & Business Media.
22. Michaud, A. M., Cambier, P., Sappin-Didier, V., Deltreil, V., Mercier, V.,

Rampon, J.-N., Trochard, R., Leclerc, B., Morel, C., Waterlot, C., & Houot, S. (2020). Mass balance and long-term soil accumulation of trace elements in arable crop systems amended with urban composts or cattle manure during 17 years. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 5367–5386. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07166-8

23. Gondek, M., Weindorf, D. C., Thiel, C., & Kleinheinz, G. (2020). Soluble salts in compost and their effects on soil and plants: A review. *Compost Science & Utilization, 28*(2), 59–75. https://doi.org/10.1080/1065657X.2020.1772906
24. Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in agronomy*, *96*, 197-247. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)96006-X
25. Arcos Torres, J. F., Arcos Logroño, J. P., & Osorio Rivera, M. Á. (2022). *El suelo y los abonos en la nutrición vegetal*. (Primera Edición). Editorial I2D Investigación, Innovación y Desarrollo.
26. Hargreaves, J. C., Adl, M. S., & Warman, P. R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, ecosystems & environment*, *123*(1-3), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004
27. Quiroz Ramírez, J. V. (2025). Valoración de la calidad del suelo: Una herramienta para la gestión ambiental del suelo en Luyando. *Tecnohumanismo*, *4*(4), 1–436. https://tecnohumanismo.online/index.php/tecnohumanismo/article/view/382