

## REACTORES OPTIMIZADOS PARA EL COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Optimized reactors for the composting of organic waste

Raúl Alejandro LIMÓN-HERNÁNDEZ\*, Verónica LÓPEZ-HERNÁNDEZ,  
Iriana HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ y José Luis XOCHIHUA-JUAN

Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, km 2.5 Carretera Gutiérrez Zamora-Boca de Lima, 93554 Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

\*Autor para correspondencia: [raul.limon@utgz.edu.mx](mailto:raul.limon@utgz.edu.mx)

*(Recibido: agosto de 2025; aceptado: noviembre de 2025)*

Palabras clave: biomasa residual, humus, digestión aerobia, nutrientes, relación A/V.

### RESUMEN

La gestión incorrecta de los residuos orgánicos ha provocado impactos ambientales y efectos en la salud humana debido a la presencia de microorganismos patógenos, la generación de lixiviados y las emisiones de gases contaminantes. Una alternativa para su tratamiento es el compostaje, un proceso bioquímico en el que se degradan de manera controlada y se obtienen sustratos orgánicos ricos en nutrientes asimilables por las plantas. Su implementación a gran escala se ha limitado a procesos de pilas y no se ha evaluado el uso de reactores que mejoren la viabilidad del proceso. En la presente investigación se realizó el diseño óptimo de un reactor para maximizar la relación área/volumen que favorezca la aeración natural sobre el sustrato. Se construyeron dos reactores: el primero utilizando materiales de bajo costo (R-1) y el segundo con bronce metálico (R-2). Se realizaron pruebas preliminares, se formuló la mezcla inicial compuesta de 7.1 kg de residuos orgánicos mezclados con aserrín hasta alcanzar una relación C/N de 35 y se monitoreó su degradación en los dos reactores. Después de tres meses se obtuvieron 2.7 y 1.4 kg de composta para R-1 y R-2, las cuales presentaron respectivamente contenidos de 459.58-1795.37 mg/kg de NO<sub>3</sub>, 1.32-132.97 mg/kg de NH<sub>4</sub>, 818.48-36594 mg/kg de K<sub>2</sub>O y 171.61-2645.69 mg/kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, además de 34.68-46.19 % de carbono orgánico y pH de 7.87-10, lo que permite establecer que la digestión se llevó a cabo de manera correcta y que la composición del sustrato depende de los residuos utilizados como materia prima.

Key words: residual biomass, humus, aerobic digestion, nutrients, A/V ratio.

### ABSTRACT

Inadequate organic waste management has environmental impacts and adverse effects on human health due to pathogen contamination, leachate generation, and pollutant gas emissions. One alternative for its treatment is composting, a biochemical process that degrades organic waste in a controlled waste management, producing organic substrates rich in plant-assimilable nutrients. Its large-scale implementation has been limited to heap processes, and the use of reactors to improve the viability of the process has not been evaluated. In this research, an optimal reactor design was developed to

maximize the area/volume ratio that favors natural aeration of the substrate. Two reactors were built: the first using low-cost materials (R-1) and the second using metallic bronze (R-2). Preliminary tests were conducted; the initial mixture was formulated, composed of 7.1 kg of organic waste mixed with sawdust until a C/N ratio of 35, was achieved, and its degradation was monitored by evaluating the two reactors. After three months, 2.7 and 1.4 kg of compost were obtained for R-1 and R-2, which respectively presented contents of 459.58-1795.37 mg/kg of  $\text{NO}_3$ , 1.32-132.97 mg/kg of  $\text{NH}_4$ , 818.48-36594 mg/kg of  $\text{K}_2\text{O}$ , and 171.61-2645.69 mg/kg of  $\text{P}_2\text{O}_5$ , in addition to 34.68-46.19% of organic carbon and pH of 7.87-10, which allows establishing that the digestion was carried out correctly and the composition of the substrate depends on the waste used as raw material.

---

## INTRODUCCIÓN

En la cadena de suministro de frutas y verduras, los comercios minoristas y los hogares son fuentes significativas de residuos orgánicos sin valor económico. Estos provienen de restos no consumidos, productos en estado de descomposición o excedentes cuya oferta supera la demanda. Estos residuos suelen disponerse en tiraderos a cielo abierto, provocando impactos ambientales negativos como lixiviados, emisiones de gases de efecto invernadero y la proliferación de fauna nociva (Delgado-Arroyo et al. 2019, Vargas-Pineda et al. 2019).

En México se aplican varias estrategias para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos, como la conversión a biogás, el uso de lodos activados y procesos aerobios para la obtención de sustratos (Mojica et al. 2016, Baker et al. 2022). El compostaje permite abordar simultáneamente la problemática de la generación de residuos, al reducir sus impactos ambientales y ofrecer la producción de un biofertilizante rico en nutrientes que mejora la calidad nutricional del suelo (Barrena 2006). Este método se ha implementado tanto en comunidades como en centros municipales de compostaje en zonas urbanas, logrando procesar diariamente grandes volúmenes de residuos orgánicos.

El compostaje es un proceso bioquímico de bajo costo que consiste en la degradación aerobia de residuos orgánicos, mediada por la acción de microorganismos como bacterias y hongos. Este proceso da como resultado un sustrato estable conocido como composta, caracterizado por su contenido de nutrientes solubles, alto porcentaje de sustancias húmicas y materia orgánica biodegradable (Macías et al. 2020). Además, debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan durante la fase termofílica, la composta se considera libre de microorganismos patógenos, semillas no deseadas y compuestos tóxicos (Oviedo-Ocaña et al. 2017).

La eficiencia del compostaje depende de varios factores clave, entre ellos la relación carbono/nitrógeno (C/N), la humedad del sustrato, la aireación y la temperatura. Una relación C/N adecuada (entre 25:1 y 35:1) favorece la actividad microbiana, mientras que niveles óptimos de humedad (50-60 %) y una buena oxigenación aseguran un entorno propicio para la descomposición aerobia. La regulación de estos parámetros es esencial para acelerar el proceso, mejorar la calidad del producto final y minimizar la emisión de gases contaminantes.

La degradación aerobia es un proceso que involucra la interacción de las fases sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida corresponde a los residuos, tanto orgánicos como inorgánicos, los cuales actúan como medio de soporte y fuente de sustrato soluble para el consorcio microbiano (Ayilara et al. 2020). La fase líquida está representada por el lixiviado, que contiene una alta carga microbiana y facilita la formación de biopelículas adheridas a las partículas sólidas, promoviendo la descomposición del material orgánico. Por su parte, la fase gaseosa es esencial en este proceso, ya que al tratarse de un sistema aeróbico, requiere un suministro constante de oxígeno atmosférico y genera dióxido de carbono como subproducto metabólico (Huang et al. 2024).

Para la obtención de composta, el proceso se divide en cuatro fases principales. Inicia con la descomposición de la materia orgánica a través de la acción de microorganismos, cuyo objetivo es transformar compuestos complejos en moléculas más simples. Esta etapa se caracteriza por ser exotérmica, evidenciada por un incremento progresivo de la temperatura del sustrato; en ella se distinguen dos fases: la fase mesófila, en la que la temperatura alcanza hasta 45 °C, y la fase termófila, en la que puede superar los 70 °C. Posteriormente, disminuye la actividad microbiana y se produce la fase de enfriamiento, en la que la temperatura desciende gradualmente hasta

alcanzar condiciones ambientales. Finalmente, la fase de maduración o estabilización reduce la actividad microbiana, permitiendo la formación de un producto final estable y seguro. La duración total del proceso puede variar desde algunas semanas hasta varios meses, dependiendo del tipo de residuo y de la técnica de compostaje empleada (Delgado-Arroyo et al. 2019, Vargas-Pineda et al. 2019).

A pesar del avance de técnicas tradicionales como las pilas volteadas y el uso de mezclas de sustratos, la eficiencia del proceso de compostaje aún presenta limitaciones asociadas al control de variables críticas como temperatura, humedad, aireación y tiempo de residencia. Estas limitantes afectan tanto la velocidad de degradación como la calidad del producto final. En este contexto, la implementación de reactores de compostaje representa una alternativa tecnológica con alto potencial. Permite un control más preciso de las condiciones del proceso, reduce los tiempos de compostaje, mejora la homogeneidad del sustrato y disminuye los impactos ambientales asociados al manejo inadecuado de residuos.

Un reactor biológico es un sistema diseñado para llevar a cabo reacciones bioquímicas, procesos simultáneos de degradación y solubilización de nutrientes a través de la acción de hongos y bacterias (Baker et al. 2022). Entre los diferentes tipos de reactores, destacan los rotatorios, ampliamente utilizados por su eficiencia y facilidad de operación. Su diseño geométrico facilita la agitación y la aireación naturales del sustrato, lo que permite un mayor control sobre variables críticas del proceso, como temperatura, humedad, porosidad y oxigenación.

Además, estos sistemas contribuyen a la reducción gradual de olores y a la recolección eficiente del lixiviado a través de su parte inferior. En condiciones operativas estándar, los reactores rotatorios pueden procesar hasta 40 kg de residuos orgánicos con una frecuencia diaria de volteo y soportar sin inconvenientes la fase termófila del compostaje. Algunos modelos integran un sistema de calentamiento del aire para mantener una temperatura óptima durante todo el proceso (de Campos et al. 2014, Cornejo y Machado 2017).

Sin embargo, la literatura especializada muestra una escasa atención al diseño, evaluación y optimización de reactores aplicados al compostaje de residuos orgánicos, especialmente en contextos urbanos o semiurbanos donde el volumen y la diversidad de los residuos requieren soluciones más eficientes y escalables. Ello justifica la necesidad de desarrollar investigaciones que aborden el diseño técnico de este tipo de sistemas, su desempeño en diferentes

condiciones operativas y su impacto en la calidad de la composta generada.

El presente proyecto tuvo como objetivo diseñar, mediante la optimización de la relación área/volumen, un reactor de degradación aerobia de residuos orgánicos que maximice la aeración de la composta sin disminuir la temperatura requerida para la degradación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño y construcción del reactor

Para la construcción del reactor experimental se propuso un volumen de 0.02 m<sup>3</sup>. Con base en este volumen, se diseñaron las dimensiones optimizando la relación área/volumen (A/V) para potenciar la aireación interna y de esta forma mejorar la degradación del material orgánico de acuerdo con las ecuaciones propuestas por Zittel et al. (2018) y López-Hernández et al. (2025). Se eligió un cilindro como forma geométrica del reactor y se plantearon las funciones para el área superficial y el volumen del cilindro, expresadas en las ecuaciones 1 y 2:

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi rL \quad (1)$$

$$V = \pi r^2 L \quad (2)$$

De la ecuación 2 se despejó el radio ( $r$ ) y se sustituyó en la expresión del área (ecuación 1), obteniéndose la siguiente función simplificada:

$$A = 2\pi \left( \sqrt{\frac{V}{\pi L}} \right)^2 + 2\pi \sqrt{\frac{V}{\pi L}} L \quad (3)$$

Posteriormente, se derivó la ecuación 3 respecto a la longitud  $L$ :

$$A' = -2VL^{-2} + \sqrt{V\pi} L^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

La derivada se igualó a cero para hallar el valor óptimo de  $L$ :

$$\frac{-2V}{L^2} + \frac{\sqrt{V\pi}}{\sqrt{L}} = 0 \quad (5)$$

Utilizando el volumen de 0.02 m<sup>3</sup>, se despejó  $L$  y se obtuvo la ecuación 6:

$$L = \left( \frac{2V}{\sqrt{V\pi}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

Finalmente, el valor de  $L$  se substituyó en la función de  $r$  para encontrar el valor óptimo del radio:

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi L}} \quad (7)$$

Una vez determinadas las dimensiones óptimas, se procedió al armado de dos reactores experimentales. El reactor 1 (R-1) se construyó con un recipiente cilíndrico de resina de polipropileno perforado con 100 orificios de 6 mm para la aireación (de Campos et al. 2014). Su base de soporte se fabricó con madera, en forma de dos tijeras unidas por tornillos, con rondanas que permiten el giro del reactor. El reactor 2 (R-2) se fabricó con bronce metálico (Zittel et al. 2018) y soporte de hierro. Incluye una manivela lateral para el giro manual del reactor. La evaluación de ambos reactores permitió determinar si el material de construcción influye en la calidad del sustrato y en el proceso de compostaje.

### **Cálculo de la mezcla de residuos orgánicos de alimentación al reactor**

Para formular las proporciones de residuos orgánicos que cumplieran con una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 35, se utilizó un simulador de mezclas para compostaje proporcionado por la empresa Green Mountain Technologies. Se empleó aserrín como agente desecante y fuente de carbono (Guo et al. 2012, Mahapatra et al. 2022).

### **Recolección de materia prima**

Los residuos orgánicos fueron recolectados en diferentes puntos de Gutiérrez Zamora, Veracruz, incluyendo tiendas de conveniencia, abarrotes y locales del mercado municipal, así como aserrín proveniente de carpinterías locales. La recolección se efectuó en dos periodos distintos: enero de 2024 para el reactor R-1 y mayo de 2024 para el reactor R-2. Posteriormente, los residuos fueron triturados y/o picados para reducir su tamaño, pesados conforme a la proporción establecida en la mezcla simulada, homogeneizados y mezclados para conformar la alimentación inicial de cada reactor. Se prepararon dos mezclas independientes, una para cada reactor experimental.

### **Proceso de compostaje en el reactor**

Para la carga inicial de los reactores, se colocó una capa de aserrín, seguida por una capa de residuos orgánicos, alternando capas hasta agotar la mezcla inicial. Cada capa tuvo una altura aproximada de 2 cm. Posteriormente, ambos reactores se humedecieron con agua mediante un aspersor hasta alcanzar un

rango de humedad del 40-60 %, medido con un sensor multiparamétrico (Siles-Castellano et al. 2020).

Los reactores fueron tapados y dejados en reposo durante 24 h. A partir de ese momento, se inició un monitoreo continuo a temperatura ambiente durante 90 días, girando los reactores diariamente para asegurar una adecuada aireación. De forma semanal se registraron la temperatura y el peso del sustrato para evaluar el avance del proceso.

### **Caracterización de la mezcla inicial de residuos y del sustrato final**

Se realizó la caracterización de la mezcla inicial y del sustrato final en cada reactor, siguiendo el procedimiento detallado a continuación.

Para la preparación de las muestras, se tomaron 100 g de material que se secaron a 60 °C hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, se pesaron 2 g de muestra seca y se colocaron en un vaso de precipitados, al que se añadieron 40 mL de una solución extractora de nutrientes HI3896 de la marca Hanna Instruments. La mezcla se agitó durante 1 min y se dejó reposar por 5 min. Luego, se centrifugó a 2000 rpm durante 5 min y se decantó para obtener el sobrenadante líquido.

Para el análisis de nutrientes, se siguieron los procedimientos establecidos por el equipo HI83325-01 (fotómetro multiparamétrico y medidor de pH para análisis de nutrientes de la marca Hanna Instruments). Se tomaron cuatro alícuotas de 10 mL del extracto y se colocaron en cubetas de medición separadas. A cada cubeta se le añadieron los reactivos específicos de Hanna Instruments para la determinación de  $\text{NH}_4$  (HI93715-01, método de Nessler),  $\text{NO}_3$  (HI93728-01, método reducción de cadmio),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (HI93717-01, método de aminoácidos) y  $\text{K}_2\text{O}$  (HI93750-01, método del tetrafenilborato).

Las muestras se analizaron individualmente en el fotómetro, obteniéndose resultados en mg/kg. Para cuantificar los sólidos volátiles (SV) y los sólidos fijos (SF), se tomaron 50 g de composta fresca y se secaron hasta alcanzar un peso constante. Los crisoles, previamente pesados, se cargaron con la muestra seca y se introdujeron en una mufla, donde se calcinaron a 550 °C durante 7 h. Finalmente, los sólidos volátiles y fijos se calcularon como la diferencia de peso antes y después de la calcinación. El carbono orgánico (CO) se estimó mediante la relación  $\text{CO} = \text{SV}/1.724$ .

Las diferencias entre la caracterización de la mezcla inicial de residuos y la del sustrato final se evaluaron mediante la prueba t de Welch para muestras independientes. Se utilizó un nivel de significancia

$\alpha = 0.05$ , considerando diferencias significativas si  $p < 0.05$  y no significativas si  $p \geq 0.05$ . Los resultados se presentaron como media  $\pm$  desviación estándar, y se emplearon superíndices (a, b) para indicar diferencias significativas entre tratamientos. Todos los análisis se realizaron con el programa estadístico R (v. 4.5.1).

## RESULTADOS

### Especificaciones de diseño del reactor

Las especificaciones de diseño de los reactores R-1 y R-2 muestran que se optó por una forma cilíndrica con diámetro y longitud casi iguales, resultando en un volumen de  $0.02 \text{ m}^3$ . La relación área/volumen (A/V) optimizada fue de  $20.38 \text{ m}^{-1}$  (**Cuadro I**).

**CUADRO I.** ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL REACTOR.

Especificación	Valor
Longitud (L)	0.294 m
Radio (r)	0.147 m
Área (A)	0.407 m <sup>2</sup>
Volumen (V)	0.02 m <sup>3</sup>
A/V	20.38 m <sup>-1</sup>

### Caracterización de los residuos orgánicos de la carga de los reactores

La mezcla inicial para la alimentación de los reactores, con una relación C/N de 35, incluyó residuos de verduras como acelga, lechuga, col, cilantro; restos de cáscara de tomate verde, tomate, cebolla y calabaza, ricos en nitrógeno; frutas, principalmente plátano (pulpa, cáscara y tallo), rico en minerales como el potasio; y aserrín como fuente de carbono. La carga inicial de los reactores R-1 y R-2 correspondió a un peso de 7.1 kg y estuvo compuesta principalmente por verduras (45 %), frutas (45 %) y aserrín (10 %), de acuerdo con la simulación (**Cuadro II**).

Los resultados de la caracterización de la mezcla de residuos vegetales mostraron una mínima variación entre los dos sustratos cargados en los

**CUADRO II.** COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA INICIAL DE CARGA AL REACTOR.

Materia prima	%
Verduras	45
Frutas	45
Aserrín	10

reactores. En el caso del porcentaje de humedad, en ambos casos se encontró fuera del rango de 50-60 % recomendado por la NMX-AA-180-SCFI-2018 (SE 2018), debido a las características propias de los residuos recolectados y a la variabilidad de sus tipos. El valor de los sólidos totales (ST) es complementario al de humedad. En cuanto a los resultados de los análisis de carbono orgánico (% C) y cenizas a 800 °C, ambos valores se encuentran muy por debajo de los recomendados por la Norma Técnica Colombiana NTC-5167 (ICONTEC 2004), que son de un máximo de 60 %.

En el caso del valor de pH obtenido, se encuentra dentro del rango permitido por la NMX-AA-180-SCFI-2018 (SE 2018), que para el caso de las compostas es de 4 a 9. Finalmente, los análisis de los nutrientes NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O indican un bajo contenido de nutrientes disponibles en los residuos, por lo que requieren de procesos de solubilización para que las macromoléculas puedan hacer que los nutrientes sean aprovechables

El análisis estadístico no encontró diferencias significativas en las características de humedad, ST, SV, cenizas y porcentaje de carbono ( $p > 0.05$ ), mientras que pH, conductividad eléctrica y nutrientes (NH<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O) mostraron diferencias significativas. Esto indica que el reactor R-1 tiene mayor cantidad inicial de nutrientes y mayor salinidad, mientras que el R-2 presenta ligeramente mayor materia orgánica y humedad. Las diferencias en los nutrientes se pueden deber a la variabilidad de los tipos de frutas y verduras que conformaron la mezcla, aunque los pesos se establecieron de acuerdo con los porcentajes del simulador. En R-1 se utilizó cáscara de plátano mientras que en R-2 se incluyó pulpa de plátano, lo cual puede influir en la caracterización (**Cuadro III**).

### Monitoreo de los reactores

En relación con el comportamiento de la temperatura durante las 12 semanas de compostaje, al comienzo del proceso, R-1 y R-2 comenzaron con la misma temperatura. Sin embargo, conforme transcurrió el proceso, R-1 tuvo valores bajos de temperatura en las semanas 1-5 y posteriormente esta se incrementó hasta un máximo de 31 °C en la semana 11. Por su parte, en R-2 la temperatura comenzó a elevarse hasta un máximo de 42 °C alcanzado en la semana 8, y en las últimas cuatro semanas del proceso se estabilizó en 34 °C. Cabe mencionar que ningún reactor alcanzó los valores de temperatura de la fase termófila ( $T > 45 \text{ °C}$ ), por lo que se deduce que la actividad microbiana estuvo limitada por factores ambientales y el proceso de compostaje se realizó

**CUADRO III.** CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO INICIAL DE CARGA DE LOS REACTORES.

Característica	Valor R-1	Valor R-2
Humedad	72.78 ± 2.47 <sup>a</sup> %	75.39 ± 0.41 <sup>a</sup> %
Sólidos totales	27.22 ± 2.47 <sup>a</sup> %	24.61 ± 0.41 <sup>a</sup> %
Sólidos volátiles a 550 °C*	85.77 ± 6.69 <sup>a</sup> %	88.67 ± 4.77 <sup>a</sup> %
Cenizas a 800 °C*	8.38 ± 1.34 <sup>a</sup> %	11.32 ± 3.22 <sup>a</sup> %
Carbono orgánico (% C)*	49.75 ± 3.88 <sup>a</sup> %	51.43 ± 2.77 <sup>a</sup> %
pH	5.98 ± 0.16 <sup>b</sup>	5.63 ± 0.12 <sup>a</sup>
Conductividad eléctrica	2359 ± 20.66 <sup>b</sup> μS/cm	1791 ± 10.53 <sup>a</sup> μS/cm
NH <sub>4</sub>	33 <sup>b</sup> mg/kg	0 <sup>a</sup> mg/kg
NO <sub>3</sub>	0 <sup>a</sup> mg/kg	0 <sup>a</sup> mg/kg
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2080 <sup>b</sup> mg/kg	1120 <sup>a</sup> mg/kg
K <sub>2</sub> O	0 <sup>a</sup> mg/kg	120 <sup>b</sup> mg/kg

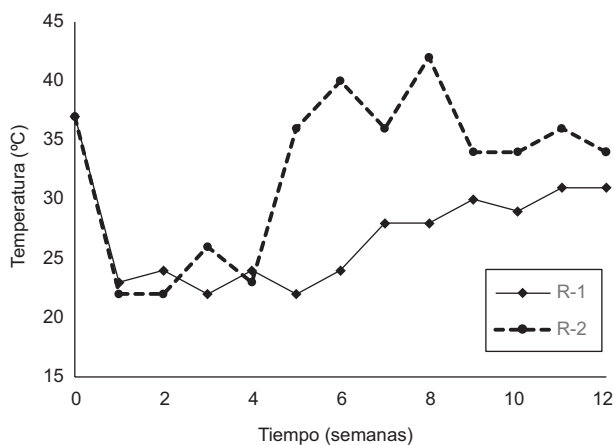
<sup>a,b</sup> Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ); letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

\*Los valores de sólidos volátiles, cenizas y carbono orgánico (% C) se expresan como porcentaje de los sólidos totales.

R-1: reactor construido con materiales de bajo costo; R-2: reactor construido con bronce metálico.

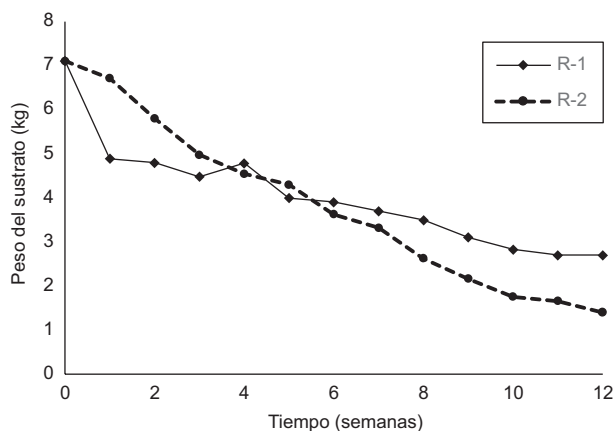
en fase mesófila ( $T < 45$  °C) referente para climas fríos (**Fig. 1**).

Respecto al peso del sustrato, la disminución en R-2 fue más constante, mientras que en R-1 tuvo algunas variaciones. La humedad del sustrato se mantuvo entre el 70 y el 80 %. En cuanto al peso, se observó una disminución con el transcurso de las semanas, debido a la pérdida de líquido en forma de lixiviado, la evaporación de la humedad y el efecto de la degradación. El producto final presentó un rendimiento de 38.03 % para R-1 y 19.59 % para R-2 respecto al peso de la carga inicial; esto es, un punto



**Fig. 1.** Monitoreo de la temperatura en los reactores durante el proceso de compostaje. R-1 se refiere al reactor de bajo costo y R-2 al reactor de bronce metálico.

a favor, ya que los residuos orgánicos generados pierden peso y el sustrato queda rico en nutrientes manejables y es más fácil de transportar (**Fig. 2**).



**Fig. 2.** Monitoreo del peso del sustrato en los reactores durante el proceso de compostaje. R-1 se refiere al reactor de bajo costo y R-2 al reactor de bronce metálico.

### Caracterización de la composta

Al término del proceso, la composta presentó un color marrón oscuro y ausencia de olores desagradables, indicativos de un compostaje adecuado (**Fig. 3**).

La caracterización final de los productos revela un alto contenido de nutrientes en cada muestra. En R-1 destaca la concentración de fuentes de nitrógeno,



Fig. 3. Composta final obtenida.

mientras que en R-2, la de fuentes de fósforo y potasio, características importantes para una composta (**Cuadro IV**).

En el análisis estadístico, todas las características presentaron diferencias significativas, lo que indica que los dos sustratos obtenidos (R-1 y R-2) son diferentes. En cuanto al contenido de nitrógeno, al inicio de la carga a los reactores, la biomasa de los residuos orgánicos mostró valores por debajo de la sensibilidad del método, por lo que se infiere un contenido de fuentes de nitrógeno soluble cercano a 0 mg/kg; al final, se observa en la composta un incremento significativo en las formas solubles de nitrógeno, con valores de  $1.32 \pm 0.23$  mg/kg de  $\text{NH}_4$  y  $1795.37 \pm 12.56$  mg/kg de  $\text{NO}_3$  en R-1, así como de  $132.97 \pm 2.88$  mg/kg de  $\text{NH}_4$  y  $459.58 \pm 71.30$  mg/kg de  $\text{NO}_3$  en R-2. Los valores diferentes pueden deberse a factores como el tipo de reactor o la temporalidad,

ya que los experimentos se desarrollaron en meses distintos; sin embargo, estos valores corresponden a las fuentes de nitrógeno que las plantas pueden absorber. Esto indica una correcta solubilización de nitrógeno por parte de los microorganismos.

La fuente soluble de potasio cuantificada en las compostas fue de  $818.48 \pm 10.41$  mg/kg de  $\text{K}_2\text{O}$  en R-1 y de  $365.94 \pm 57$  mg/kg de  $\text{K}_2\text{O}$  en R-2, siendo este último reactor el que contenía inicialmente una cantidad mayor de plátano (pulpa y cáscara), lo cual evidencia que las porciones y el tipo de residuos afectan la caracterización de la composta.

Finalmente, respecto de la fuente de fósforo cuantificada, esta fue de  $171.61 \pm 5.69$  mg/kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  en R-1 y de  $2645.69 \pm 76.85$  mg/kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  en R-2. En ambos casos, el incremento se debió a la solubilización de nutrientes por los microorganismos presentes en la composta. Es importante destacar la importancia biológica del fósforo en las plantas, ya que estas lo utilizan principalmente para el crecimiento; su relevancia radica en su participación en la síntesis de ATP, por lo que se puede visualizar que el compostaje promueve su solubilización.

Al comparar los niveles de nutrientes de R-1 y R-2, se puede establecer que las proporciones y la diversidad de residuos al iniciar el compostaje se reflejan directamente en la composición final de la composta, y que un estudio posterior, manteniendo los mismos sustratos en cada reactor y no centrándose en la relación C/N, podría resultar en un comparativo más fiable para conocer el efecto del material del reactor sobre el proceso.

El pH en ambos experimentos comenzó con valores ácidos y finalizó con  $7.87 \pm 0.47$  en R-1 y  $10 \pm 0.11$  en R-2, mientras que los niveles de CO fueron

**CUADRO IV. CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSTA.**

Característica	Valor R-1	Valor R-2
pH	$7.87 \pm 0.47^a$	$10 \pm 0.11^b$
$\text{P}_2\text{O}_5$	$171.61 \pm 5.69^a$ mg/kg	$2645.69 \pm 76.85^b$ mg/kg
$\text{NH}_4$	$1.32 \pm 0.23^a$ mg/kg	$132.97 \pm 2.88^b$ mg/kg
$\text{NO}_3$	$1795.37 \pm 12.56^b$ mg/kg	$459.58 \pm 71.30^a$ mg/kg
$\text{K}_2\text{O}$	$818.48 \pm 10.41^a$ mg/kg	$365.94 \pm 57^b$ mg/kg
Sólidos volátiles a 550°C *	$59.8 \pm 0.08^a$ %	$79.63 \pm 0.28^b$ %
Cenizas 800°C*	$40.2 \pm 0.04^b$ %	$20.36 \pm 0.23^a$ %
% C*	$34.68 \pm 0.08^a$ %	$46.19 \pm 0.28^b$ %

<sup>a,b</sup>Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ); letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

\*Los valores de sólidos volátiles, cenizas y carbono orgánico (% C) se expresan como porcentaje de los sólidos totales.

R-1: reactor construido con materiales de bajo costo; R-2: reactor construido con bronce metálico.

de  $34.68 \pm 0.08$  % en R-1 y  $46.19 \pm 0.28$  % en R-2, lo que se relaciona con la materia orgánica en forma de humus y con el carbono soluble (Pérez-Méndez et al. 2011).

## DISCUSIÓN

La relación área/volumen (A/V) optimizada de  $20.38 \text{ m}^{-1}$  indica un diseño compacto con máxima área superficial relativa, favoreciendo la aireación y, por ende, una degradación más eficiente de la materia orgánica. Este diseño concuerda con los estudios de Zittel et al. (2018), que destacan la importancia de maximizar la superficie para mejorar la actividad microbiana, y con Ayilara et al. (2020), quienes determinaron que la optimización es clave para el intercambio gaseoso de oxígeno del aire hacia el sustrato y de dióxido de carbono del sustrato al aire.

Aunque no hubo una selección de los residuos de restos de frutas y verduras, sino que se utilizaron de acuerdo con su disponibilidad, la simulación de la mezcla inicial fue similar a las reportadas por Guo et al. (2012) y Mahapatra et al. (2022), quienes mencionaron que el uso de residuos combinados promueve el balanceo del contenido de carbono y nitrógeno, lo cual es fundamental para estimular la actividad microbiana durante el compostaje.

La caracterización física y química inicial indicó una humedad elevada (72-75 %), fuera del rango ideal de 50-60 % señalado por Delgado-Arroyo et al. (2019), lo que probablemente limitó la aireación y pudo haber impedido que se alcanzara la fase termófila, ya que las temperaturas máximas permanecieron por debajo de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  durante todo el proceso. El contenido de carbono orgánico, cenizas y pH se mantuvo dentro de rangos comparables con otros estudios, lo que valida la representatividad de la mezcla inicial.

El monitoreo de la temperatura mostró diferencias notables entre reactores. R-2 alcanzó un máximo de  $42 \text{ }^\circ\text{C}$  en la semana 8, mientras que R-1 solo llegó a  $31 \text{ }^\circ\text{C}$  en la semana 11, sin que alguno alcanzara la fase termófila ( $> 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ), en contraste con lo reportado por Siles-Castellano et al. (2019) y Palaniveloo et al. (2020). Esto indica que la actividad microbiana fue predominantemente mesófila, probablemente influenciada por la elevada humedad y por factores ambientales.

El rendimiento final del producto fue del 38.03 % para R-1 y 19.59 % para R-2. La disminución de peso debida a la pérdida de masa por la evaporación, lixiviación y mineralización es típica de procesos de compostaje; los rendimientos encontrados se encuentran

por debajo del 23.53 % reportado por Cornejo y Machado (2017) y del rango de 50-70 % reportado por Vargas-Pineda et al. (2019), lo que puede relacionarse con las condiciones experimentales y la composición de la mezcla inicial.

Ambos productos finales de composta presentaron, de manera visual, características organolépticas similares; aunque variaron, tuvieron alto contenido de nutrientes solubles. Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las características físicas y químicas analizadas entre los tratamientos R-1 y R-2, de acuerdo con la prueba t de Welch. El pH presentó un incremento notable en R-2 ( $10 \pm 0.11^b$ ) respecto a R-1 ( $7.87 \pm 0.47^a$ ), lo que indica una tendencia hacia condiciones más alcalinas en el segundo reactor, posiblemente asociada a la liberación de amoníaco durante la degradación de compuestos nitrogenados. Los resultados de pH fueron similares a los reportados por Zittel et al. (2018), quienes registraron un pH de 5 a 9, así como a los de Bárbaro et al. (2019), quienes obtuvieron valores de 4.7 a 8.72. El aumento de pH en los reactores R-1 y R-2 se debe a la descomposición de las moléculas y posteriormente a la formación de ácidos orgánicos y húmicos productos del compostaje.

El contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  fue significativamente mayor en R-2 ( $2645.69 \pm 76.85^b \text{ mg/kg}$ ) que en R-1 ( $171.61 \pm 5.69^a \text{ mg/kg}$ ), lo que sugiere una mayor mineralización del fósforo en este tratamiento. De manera similar, la concentración de  $\text{NH}_4^+$  fue más alta en R-2 ( $132.97 \pm 2.88^b \text{ mg/kg}$ ), mientras que en R-1 se registraron valores más bajos ( $1.32 \pm 0.23^a \text{ mg/kg}$ ). En contraste, los valores de  $\text{NO}_3^-$  fueron significativamente mayores en R-1 ( $1795.37 \pm 12.56^b \text{ mg/kg}$ ) frente a R-2 ( $459.58 \pm 71.30^a \text{ mg/kg}$ ).

Palaniveloo et al. (2020) señalan que la diferencia entre los valores de  $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_3$  en las pruebas experimentales se debe a que los microorganismos nitrificantes reducen el contenido de  $\text{NH}_4$  y promueven la formación de  $\text{NO}_3$ . Sin embargo, un punto a resaltar es la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^- < 0.5$ , que concuerda con Pérez-Méndez et al. (2011) y confirma la madurez del sustrato, asegurando que la composta está lista para su aplicación agrícola sin riesgo de fitotoxicidad. Se debe tomar en cuenta que, según Delgado-Arroyo et al. (2019), en caso de utilizar una composta inmadura, se corre el riesgo de afectar la inmovilización de las fuentes de nitrógeno en el suelo y provocar un efecto adverso en el crecimiento de las plantas, o incluso de promover fitotoxicidad y afectar la germinación de las semillas.

El contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  también presentó una diferencia sustancial, siendo mucho mayor en R-2 ( $36594$

$\pm 57^b$  mg/kg) que en R-1 ( $818.48 \pm 10.41^a$  mg/kg), lo que refleja un enriquecimiento en potasio disponible en el segundo reactor. En cuanto a los parámetros de materia orgánica, el porcentaje de sólidos volátiles fue significativamente más alto en R-2 ( $79.63 \pm 0.28^b$  %) comparado con R-1 ( $59.8 \pm 0.08^a$  %), lo que indica un mayor contenido de compuestos orgánicos susceptibles de degradación térmica.

Por otro lado, el contenido de cenizas ( $800^\circ\text{C}$ ) fue mayor en R-1 ( $40.2 \pm 0.04^b$  %) que en R-2 ( $20.36 \pm 0.23^a$  %), lo que evidencia una mayor proporción de material mineral residual en el primero. Finalmente, el contenido de carbono orgánico (% C) fue significativamente más elevado en R-2 ( $46.19 \pm 0.28^b$  %) que en R-1 ( $34.68 \pm 0.08^a$  %), lo que sugiere un compost con mayor carga orgánica residual y posiblemente una menor tasa de humificación.

Finalmente, el reactor diseñado demostró ser eficiente para acelerar la descomposición aerobia en condiciones mesófilas, logrando un producto final estable y con nutrientes disponibles en un plazo de 90 días similar a lo reportado por Zittel et al. (2018), lo que representa una mejora respecto a otros sistemas que requieren tiempos de maduración adicionales.

## CONCLUSIONES

El diseño realizado mediante técnicas de optimización y la construcción de un biorreactor aerobio para la obtención de sustratos orgánicos destinados a la agricultura representan un paso significativo hacia la sostenibilidad ambiental, ya que proponen una alternativa viable, económica y rentable para el tratamiento de residuos orgánicos provenientes de residuos sólidos urbanos que de otra forma serían destinados a un basurero de cielo abierto y provocarían un impacto ambiental negativo. Por otro lado, se promueven prácticas agrícolas ecoamigables en cuanto al uso de sustratos orgánicos como la composta para fertilizar los suelos degradados y mejorar el crecimiento de los cultivos de forma natural y libre de los daños ambientales que ocasionan los fertilizantes químicos.

Las dimensiones del biorreactor y su relación área/volumen fueron cuidadosamente calculadas para garantizar una óptima eficiencia en la descomposición de la materia orgánica, maximizando así la aireación, lo que aumenta la velocidad de descomposición y la producción de sustratos útiles para la agricultura.

Las características físicas y químicas de la composta sugieren que estuvo lista para su uso en 90

días de proceso. Esto es importante debido a que en algunos trabajos que han utilizado reactores sin optimizar se menciona que después del tiempo de compostaje se debe tener un tiempo de maduración de aproximadamente tres meses, por lo que el proceso completo para la obtención y uso de los sustratos llega a ser de hasta seis meses en esos equipos, comparado con los tres meses aquí propuestos.

Como perspectivas a futuro, se sugiere un análisis del proceso simultáneo en R-1 y R-2 para comparar si el tipo de material afecta de manera significativa los niveles de nutrientes.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico por el financiamiento al proyecto CP 1111 2051/2023 “Evaluación de un reactor de digestión aerobia para la obtención de sustratos orgánicos para la agricultura”.

## REFERENCIAS

- Ayilara M.S., Olanrewaju O.S., Babalola O.O. y Odeyemi O. (2020). Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability* 12, 4456. <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Baker P.W., Preskett D., Krienke D., Runager K.S., Hastrup A.C.S. y Charlton A. (2022). Pre-processing waste tomatoes into separated streams with the intention of recovering protein: Towards an integrated fruit and vegetable biorefinery approach to waste minimization. *Waste and Biomass Valorization* 13, 3463-3473. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01748-3>
- Bárbaro L., Karlanian M., Rizzo P. y Riera N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 35 (2), 126-136. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>
- Barrena Gómez R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Tesis de doctorado. Departament D'Enginyeria Química, Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona, España, 315 pp.
- Cornejo C.S. y Machado M.J. (2017). Diseño y construcción de un reactor batch prototipo para la obtención de compost con residuos orgánicos generados en la Escuela Politécnica de Chimborazo. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Escuela Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 96 pp.

- De Campos S.X., Resseti R.R. y Zittel R. (2014). Monitoring and characterization of compost obtained from household waste and pine sawdust in a facultative reactor by conventional and spectroscopic analyses. *Waste Management and Research* 32 (12), 1186-1191. <https://doi.org/10.1177/0734242x14543817>
- Delgado-Arroyo M.D.M., Mendoza-López K.L., González M.I., Tadeo-Lluch J.L. y Martín-Sánchez J.V. (2019). Assessment of the composting process of poultry manure using different mixtures of substrates. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 35 (4), 965-977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Guo R., Li G., Jiang T., Schuchardt F., Chen T., Zhao Y. y Shen Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology* 112, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>
- Huang L., Hou J. y Liu H. (2024). Machine-learning intervention progress in the field of organic waste composting: Simulation, prediction, optimization, and challenges. *Waste Management*, 178, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.022>
- ICONTEC (2004). Norma Técnica Colombiana NTC-5167. Productos para la industria agrícola. Acondicionadores de suelos y enmiendas calcáreas y dolomíticas. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, Colombia, 22 de diciembre.
- López-Hernández V., Limón-Hernández R.A., Morales-Moguel O.E., Pérez-García V.L. y García-Ramírez I.A. (2025). Diseño óptimo de un reactor de digestión aerobia para el tratamiento de residuos orgánicos municipales. En: *Ambiente y bioenergía. El camino a la sustentabilidad* (Tecorralco-Bobadilla A.L., Sotelo-Navarro P.X., Carreto-Morales E.Y., Baahena-Ramírez J., Ortega-Clemente L.A. y Santiago-Valentín E., Eds). Abiaer, Ciudad de México, México, 481-488.
- Macías Duarte R., Grijalva Contreras R.L., Robles Contreras F., López Carvajal A. y Núñez Ramírez F. (2020). Respuesta de la composta sobre la fertilidad, humedad del suelo, contenido nutrimental en hojas y productividad en olivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11 (8), 1879-1890. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2141>
- Mahapatra S., Ali M.H. y Samal K. (2022). Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin. *Energy Nexus* 6, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100062>
- Mojica C., Vidal E., Rueda B. y Acosta D. (2016). Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso potencial en la producción de biogás. *Revista de Energía Química y Física* 3 (6), 15-22.
- Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo-Rebellón L. y 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.
- Palaniveloo K., Amran M.A., Norhashim N.A., Mohamad-Fauzi N., Peng-Hui F., Hui-Wen L., Kai-Lin Y., Jiale L., Chian-Yee M.G., Jing-Yi L., Gunasekaran B. y Razak S.A. (2020). Food waste composting and microbial community structure profiling. *Processes* 8 (6), 723. <https://doi.org/10.3390/pr8060723>
- Pérez-Méndez M.A., Sánchez-Hernández R., Palma-López D.J. y Salgado-García S. (2011). Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste mexicano. *Interciencia* 36 (1), 45-52.
- SE (2018). Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-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. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación, México, 26 de septiembre.
- Siles-Castellano A.B., López M.J., Jurado M.M., Suárez-Estrella F., López-González J.A., Estrella-González M.J. y Moreno J. (2020). Industrial composting of low carbon/nitrogen ratio mixtures of agri-food waste and impact on compost quality. *Bioresource Technology* 316, 123946. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123946>
- Vargas-Pineda O.I., Trujillo-González J.M. y Torres-Mora M.A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia* 23 (2), 123-129. <https://doi.org/10.22579/20112629.575>
- Zittel R., Pinto C., Domingues C.E., Hass D.C., Estrada R.A. y de Campos S.X. (2018). Composting of smuggled cigarettes tobacco and industrial sewage sludge in reactors: Physicochemical, phytotoxic and spectroscopic study. *Waste Management* 79, 537-544. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.009>