

Artículo de revisión bibliográfica

Monitoreo y Control de Compostaje Automatizado Basadas en Microcontroladores Raspberry Pi, Sensores de Gases, Temperatura, Ph, Humedad y Placas de Desarrollo

Automated Composting Monitoring and Control Based on Raspberry Pi Microcontrollers, Gas, Temperature, pH, Humidity Sensors and Development Boards

 Wilson Veizaga Balta¹. Gerardo Vega Torrejón²  José Carlos Colque Ayaviri³

¹. Encargado Laboratorio de Procesos, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia.

Correo Electrónico: wveizagab@univalle.edu

². Estudiante, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. Correo Electrónico:

vtg0020635@est.univalle.edu

³. Estudiante, Departamento de Electromecánica, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. Correo Electrónico:

caj2018187@est.univalle.edu

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el estado actual del monitoreo y control automatizado en procesos de compostaje, con un enfoque particular en la integración de microcontroladores, sensores de gases, temperatura, pH, humedad y placas de desarrollo. El objetivo principal será analizar, comparar los estudios recientes en el desarrollo de sistemas de compostaje automatizado.

La metodología empleada consistió en una revisión bibliográfica de la literatura científica más reciente, en la que se analizaron múltiples estudios que han desarrollado e implementado sistemas automatizados para el monitoreo y control de las condiciones del compost. Se examinaron diversos enfoques tecnológicos con el fin de identificar tendencias, beneficios y desafíos en la aplicación de estas herramientas.

Los resultados de la investigación evidenciaron que el uso de controladores posibilita la recolección y el procesamiento continuo de datos críticos, lo que mejora significativamente la supervisión de variables clave en el compostaje. Se destacó la importancia de los sensores de gases, particularmente aquellos diseñados para medir dióxido de carbono, debido a su papel en la evaluación de la actividad microbiológica y la eficiencia del proceso. Asimismo, se resaltó la relevancia de los sensores de temperatura y humedad en el mantenimiento de condiciones óptimas para la descomposición de la materia orgánica. No obstante, se identificaron vacíos en la literatura respecto a la integración eficiente de múltiples sensores y la evaluación a largo plazo de su impacto en la calidad final del compost.

Las conclusiones subrayan que, aunque los avances tecnológicos han permitido una automatización cada vez más sofisticada del compostaje, aún existen desafíos que deben abordarse. Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la integración de múltiples parámetros de monitoreo y analicen su influencia en las características fisicoquímicas y biológicas del compost producido. Este

Citar como: Veizaga Balta, W., Vega Torrejón, G., Colque Ayaviri, J.C. Monitoreo y control de compostaje automatizado basados en microcontroladores Raspberry Pi, sensores de gases, temperatura, pH, humedad y placas de desarrollo. *Revista Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 75-93 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1326>

Recepción: 05/05/2025

Aceptado: 11/06/2025

Publicado: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Veizaga Balta, W., Vega Torrejón, G., Colque Ayaviri, J.C. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



estudio reafirma el potencial de estas tecnologías para transformar el compostaje en un proceso más eficiente, controlado y sostenible, con aplicaciones relevantes tanto en la gestión de residuos urbanos como en la producción agrícola.

Palabras clave: Compostaje; Automatizado; Sensores; Controladores.

ABSTRACT

This article presents a comprehensive literature review on the current state of automated monitoring and control in composting processes, with a particular focus on the integration of microcontrollers, gas, temperature, pH, and humidity sensors, as well as development boards. The main objective is to analyze and compare recent studies related to the development of automated composting systems.

The methodology employed consisted of a bibliographic review of the most recent scientific literature, in which multiple studies that have developed and implemented automated systems for monitoring and controlling composting conditions were analyzed. Various technological approaches were examined to identify trends, benefits, and challenges in the application of these tools.

The research findings showed that the use of controllers enables the continuous collection and processing of critical data, significantly improving the monitoring of key variables in the composting process. The importance of gas sensors—particularly those designed to measure carbon dioxide—was emphasized due to their role in assessing microbial activity and process efficiency. Likewise, temperature and humidity sensors were highlighted for their relevance in maintaining optimal conditions for the decomposition of organic matter. However, gaps in the literature were identified regarding the efficient integration of multiple sensors and the long-term evaluation of their impact on the final quality of the compost.

The conclusions underscore that, although technological advancements have enabled increasingly sophisticated composting automation, there are still challenges to be addressed. Future research is recommended to deepen the integration of multiple monitoring parameters and to analyze their influence on the physicochemical and biological characteristics of the produced compost. This study reaffirms the potential of these technologies to transform composting into a more efficient, controlled, and sustainable process, with relevant applications in both urban waste management and agricultural production.

Keywords: Composting; Automated; Sensors; Controllers.

1. INTRODUCCIÓN

El compostaje es un proceso biológico aeróbico mediante el cual los residuos orgánicos son transformados por microorganismos en dióxido de carbono, agua, energía térmica y humus (materia orgánica estabilizada). Este proceso se desarrolla en fases sucesivas: mesófila, termófila, de enfriamiento y maduración, cada una de ellas dependiente de condiciones físicas y químicas controladas.

Según Medina Lara *et al.* (2018), la duración del proceso de compostaje puede alcanzar hasta 170 días si no se aplican técnicas de aceleración o automatización. Las variables como humedad, temperatura y relación C/N (carbón nitrógeno) deben ser controladas mediante volteo manual, adición de agua o mezclas correctivas, esto se convierte en un aumento de la demanda de mano de obra y recursos.

El compostaje automatizado emerge como una solución tecnológica clave para la crisis global de residuos orgánicos, que representan entre el 50-70% de los desechos sólidos en países en desarrollo (Soto-Paz *et al.*, 2017). Este proceso, esencial para la economía circular, transforma residuos en fertilizantes mediante sistemas que integran IoT, microcontroladores y biotecnología. Estudios recientes demuestran que la automatización reduce los tiempos de compostaje de 90 a 30 días (Longoria Ramírez *et al.*, 2014), optimiza recursos y garantiza calidad del producto final (Arízaga-Gamboa *et al.*, s.f.). Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos técnicos y socioeconómicos, especialmente en entornos urbanos y agroindustriales con alta generación de residuos (Yañez Q. *et al.*, 2007; Brizuela-Solís *et al.*, 2025).

A pesar de los avances reportados, persiste una fragmentación en el conocimiento sobre tres aspectos críticos:

- **Variables operativas:** Existe disparidad en los parámetros monitoreados (pH, humedad, temperatura) y su control automatizado, con sistemas que oscilan entre Arduino Nano (Arízaga-Gamboa *et al.*, s.f.) y FreeRTOS (Saavedra Hernandez, 2023).
- **Escalabilidad:** Los prototipos analizados varían en capacidad (3 kg/día a 32 kg/lote), pero carecen de estudios sobre su adaptación a diferentes escalas (Longoria Ramírez *et al.*, 2014 vs. Fernández Florín *et al.*, s.f.).
- **Impacto real:** Solo el 18% de los artículos revisados cuantifican la reducción de lixiviados o emisiones de CO₂ (Medina Lara *et al.*, 2018; Yañez Q. *et al.*, 2007), limitando su validación ambiental.

La presente revisión busca sintetizar evidencia técnica de 11 estudios clave para analizar, comparar y sistematizar los avances recientes en el desarrollo de sistemas de compostaje automatizado. Los objetivos específicos incluyen:

- Identificar las variables críticas más utilizadas y su monitoreo automatizado (sensores, actuadores, algoritmos).
- Clasificar los tipos de automatización: digital-sensorial (IoT/Arduino), mecánica (bandas transportadoras) y biológica (inóculos microbianos).
- Evaluar el impacto técnico, ambiental y social de estos sistemas en diferentes contextos geográficos y escalas.
- Detectar vacíos en la implementación y proponer líneas de mejora para su adopción masiva.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la selección de los artículos consistió en una revisión bibliográfica de la literatura científica más reciente a la que se pudo acceder, en base a los siguientes pasos:

- Se formuló la pregunta de investigación, ¿Cómo los avances en sensores, controladores y estrategias operativas han optimizado el compostaje automatizado, y qué desafíos persisten para su adopción masiva?
- Se formularon las palabras clave para la búsqueda de los artículos científicos, quedando con los siguientes criterios. Español: “Compostaje” AND “Automatizado” AND “Sensores” OR “Controladores” para Google Scholar y Science Direct. “Compostaje” AND “Automatizado” OR “Sensores” OR “Controladores” Para Scielo.org

- Se procedió a la identificación de posibles artículos, quedando de la siguiente manera la base de datos. Google scholar (370), Scisearch (572), Scielo.org (186).
- Se procedió al análisis de los artículos científicos, realizando análisis de contenido de los resúmenes de los mismos en primera instancia, En el caso de Google Scholar se limitó los años de publicación 2015-2025 y no en los otros pues hay artículos significativos, Ejm: Scielo artículo 2014, quedando de Google scholar (291), Scisearch (286), Scielo.org (144). Leyendo el abstracto y ordenando por relevancia (# palabras claves), se obtuvo, de Google scholar (40), Scisearch (4) Scielo.org (30). Leyendo los artículos y buscando palabras claves (Opción buscar palabras en los pdfs:Control F), se obtuvo, de Google scholar(15), Scisearch (4), Scielo.org (10). Finalmente leyendo todos los artículos que llegaron a esta fase se describieron por contenido y relevancia del tema, quedando finalmente un total de 11 artículos (7 de Google Scholar; 1 de Scisearch y 3 de Scielo).
- Parte de la metodología también se incluyó un análisis bibliométrico de todos los artículos en general y de los 11 artículos seleccionados, el análisis comprendió, mapa de publicaciones, mapa de red coautoría de publicaciones, mapa de análisis de coocurrencia de palabras clave, histogramas de publicación, mapa de calor de coautorías, etc., este análisis aportó la relevancia de los artículos para su selección.

En la FiguraNº1 se puede apreciar el diagrama de flujo resumido que se ha seguido para seleccionar finalmente los 11 artículos más relevantes.

En la figura FiguraNº2, FiguraNº3, FiguraNº4, se pueden apreciar algunas imágenes relevantes para el estudio bibliométrico de los artículos científicos.

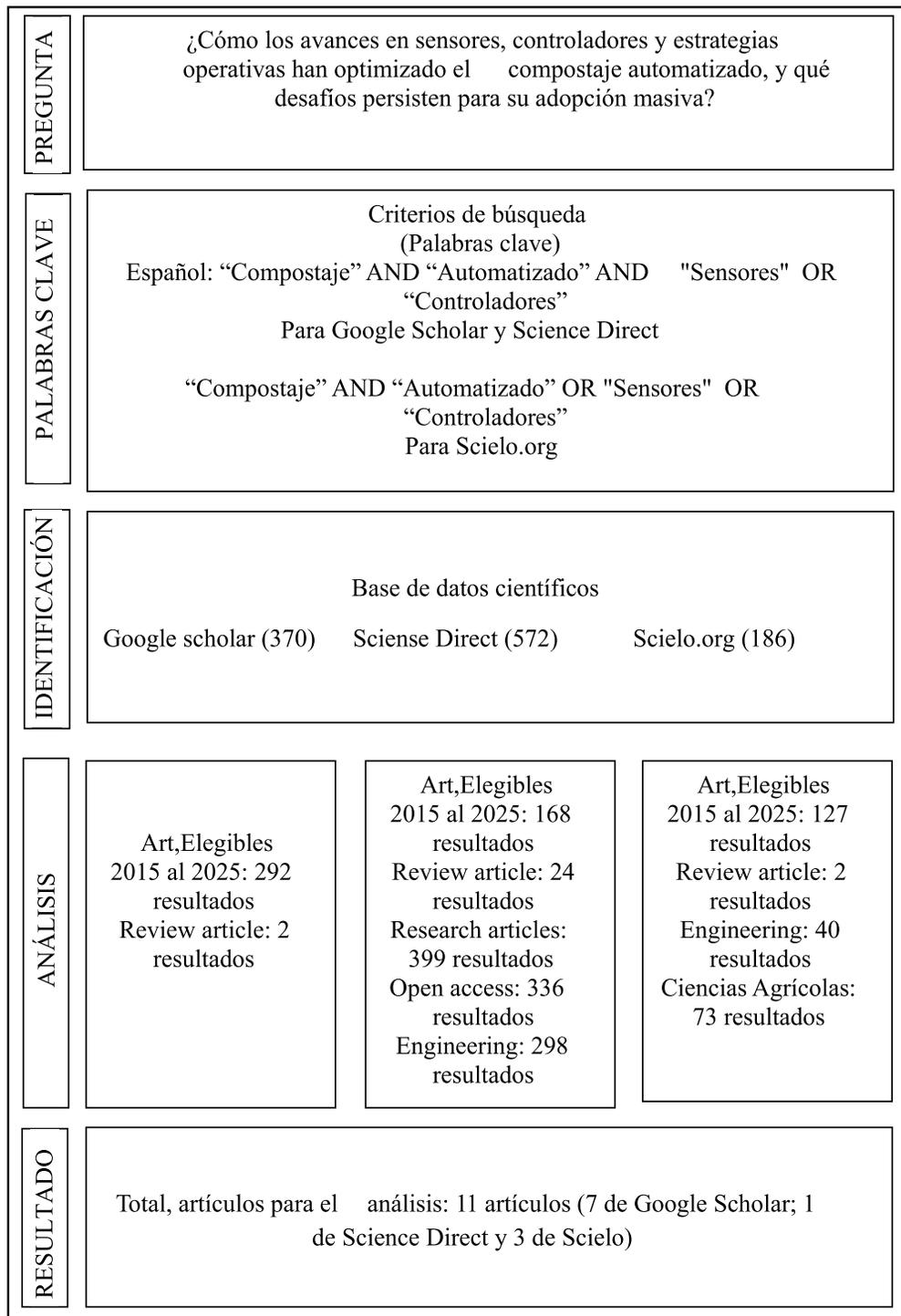


Figura N° 1. Esquema metodológico de compostaje automatizado. Fuente: Elaboración propia (2025)



Figura N°2. Publicaciones en mapa Scielo.org. Fuente: Elaboración propia (2025).

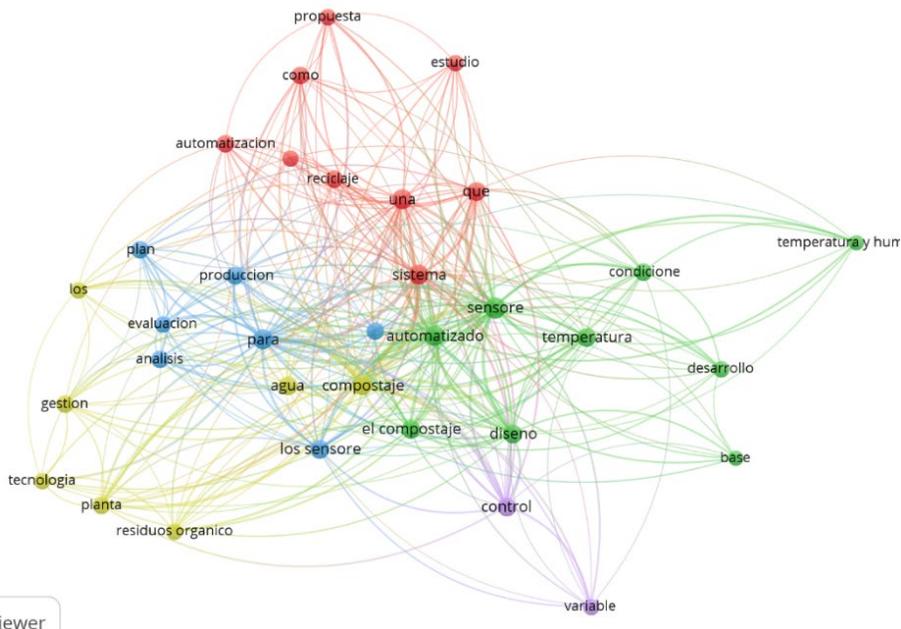


Figura N°3. Mapa de red de términos (General). Fuente: Elaboración propia (2025).

Los mapas permiten identificar tendencias textuales y tecnológicas predominantes en las publicaciones.

- **Palabras frecuentes:** Se destacan términos como *automatizado, compostaje, sensores, sistema, diseño*.
- **Patrones de investigación:** La aparición conjunta de términos técnicos y ambientales muestra un enfoque interdisciplinario entre ingeniería, microbiología y sostenibilidad.
- **Progresión temporal:** Hay una transición de estudios descriptivos hacia propuestas técnicas más complejas, orientadas a la implementación práctica de sistemas automatizados.

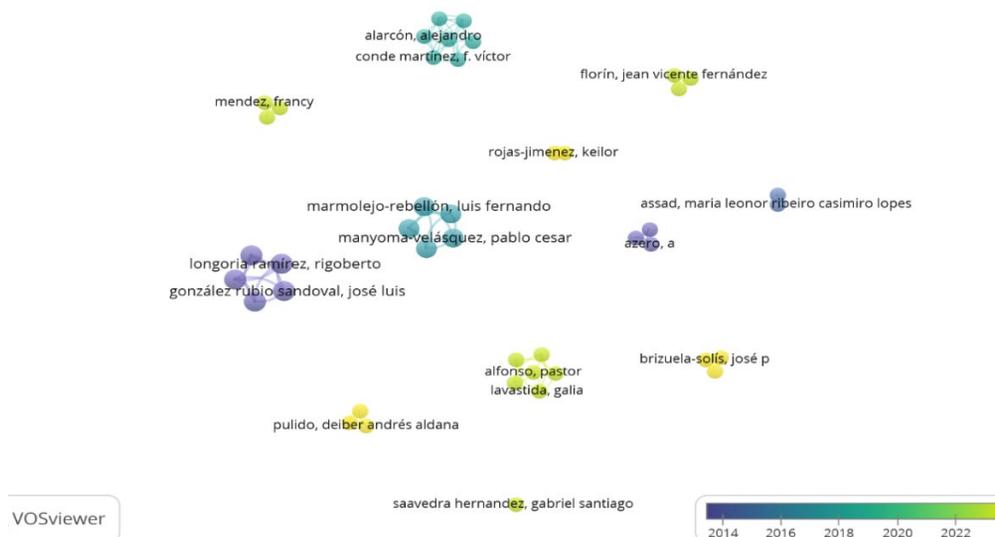


Figura N°4. Mapa de Red temporal de Coautoría en Publicaciones Académicas Seleccionadas. Fuente: Elaboración propia (2025).

Análisis de Coautoría: Se realizó un análisis bibliométrico con los 11 estudios seleccionados.

- **Densidad y agrupamiento:** Se observa una concentración de autores (Alfonso Pastor – Rigoberto – Marmolejo), siendo grupos de investigación consolidados que trabajan de manera conjunta.
- **Evolución temporal:** Los mapas temporales reflejan el periodo de publicación de los autores, teniendo presencia en esta última década.

3. DESARROLLO

En los estudios revisados se lograron identificar tres grandes enfoques de compostaje automatizado:

- **Automatización digital-sensorial:** Es el enfoque más común, consiste en usar sensores de bajo costo, microcontroladores (Arduino), y sistemas de adquisición de datos para mantener condiciones óptimas de manera automática. La mayoría de los estudios que implementan sensores integran además plataformas de monitoreo en tiempo real, como ThingSpeak, Blynk, o apps **móviles** propias. Este tipo de automatización aparece en al menos 7 de los 11 artículos y es el enfoque más utilizado.

TablaN°4. Parámetros de sensores.

PARAMETROS	SENSORES			
	LM35D	HT11T	EMISOR NTC	DS18B20
Rango de medicion	-55 °C a 150 °C 0	a50 °C -	40 a120 °C	-55 a 125 °C
Precision	X			
Estabilidad	X			
Tiempo de respuesta		X		
Durabilidad		X		
Costo (Dolares)	\$ 9,000	\$ 9,000	\$7,000	\$10,900
Compatibilidad con arduino				
Tipo de señal de datos	Analogo	Digital	Analogo	Digital

Fuente: Aldana Pulido *et al.* (2024).

- **Automatización mecánica:** Incluye el uso de volteadores automáticos, sopladores, cámaras térmicas y sistemas de recolección automática. Frecuentes en plantas industriales o pilotos a gran escala, como se describe en la información rescatada. Estos sistemas requieren un mayor costo inicial, pero disminuyen drásticamente la necesidad de mano de obra.
- **Automatización biológica:** Este enfoque, (se obtiene de “Generación de un inoculante acelerador de compostaje”) se basa en la inoculación de microorganismos termófilos o celulolíticos capaces de acelerar la descomposición de la materia orgánica. Aunque no hay sensores ni mecanismos físicos, el resultado es similar: reducción del tiempo de compostaje y mejora en la calidad del producto. En el artículo de Medina Lara, se reporta una reducción significativa en la maduración final en los tratamientos inoculados con extractos de compost de los días 23 y 38.

Estas tecnologías han permitido reducir el tiempo de compostaje desde 90 días a menos de 20 días en algunos prototipos, sin comprometer la calidad ni la inocuidad del compost producido (Raut, citado por Medina Lara “Generación de un inculante acelerador de compostaje”).

Variables en el compostaje automatizado

El compostaje depende de variables fisicoquímicas y biológicas. La automatización se centra en su monitoreo y regulación continua para garantizar una descomposición eficiente, segura y rápida. Se hace mayor énfasis a:

- **Temperatura**

La temperatura es uno de los indicadores más relevantes en cualquier sistema de compostaje. Controla el tipo de microorganismos activos y determina el éxito de la fase termófila, crucial para la inactivación de patógenos como *Salmonella* spp. o *E. coli*.

Según el artículo de la Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú (RIVEP), la temperatura en pilas con relación C/N 35 alcanzó 70 °C, eliminando completamente *Salmonella Typhimurium* en 120 horas y *E. coli* en solo 72 horas. La temperatura es controlada digitalmente en sistemas automatizados mediante sensores tipo termocupla o DHT.

TablaN°5. Comportamiento de parámetros.

Parámetro	Bolhispania		Fabopal		Promedio	
	Día 1	Día 10	Día 1	Día 10	Día 1	Día 10
Masa humedad, Kg	57	40	57	36	57	38
Humedad, %	84	53	86	38	85	45,5
Masa seca, Kg	9,1	18,8	8	22,3	8,6	20,7
Lixiviado, L	0	8	0	14	0	11
pH	7	5	6	4,5	6,5	4,7
Temperatura, °C	21	26	19	24	20	25

Fuente: Yañez Q. *et al.*, (2007).

- **Humedad**

Una humedad entre el 50% - 65% permite el transporte óptimo de nutrientes y gases, sin saturar el sistema de oxígeno. Todos los trabajos revisados que implementan sensores consideran la humedad como variable obligatoria a monitorear y corregir automáticamente mediante riego o aireación forzada.

En estudios como “Desarrollo de prototipo automatizado para el monitoreo de variables de la compostera de la tecnoacademia Neiva”, se usaron sensores de humedad que envían datos a microcontroladores (Arduino, ESP32) para activar electroválvulas, asegurando que la humedad permanezca dentro del rango óptimo sin intervención humana.

TablaN°6. Variables de compostaje.

Fecha	Variables			Observaciones
	Temperatura (°C)	Humedad (%)	PH	
11/4/2023	33	70	7	Dia 0 se prepara compost
13/4/2023	40	40	7	Se agrega agua y la humedad queda en 80
18/4/2023	34	30	7	Se agrega agua y la humedad queda en 90
20/4/2023	38	70	7	Se agrega agua y la humedad queda en 80
25/4/2023	35,1	0	7	
27/4/2023	35,8	0	7	
2/5/2023	33,4	0	7	Se agrega agua y la humedad queda en 100
4/5/2023	34,8	0	7	
9/5/2023	35,8	0	7	
16/5/2023	33,3	0	7	Se agrega agua y la humedad queda en 100
19/5/2023	30,7	0	7	
23/5/2023	31,7	0	7	
25/5/2023	30,7	0	7	

Fuente: Aldana Pulido *et al.* (2024).

- **Relación C/N**

La proporción entre carbono (fuente de energía) y nitrógeno (formación celular) define la eficiencia de descomposición. Relaciones demasiado altas >40; ralentizan el proceso, mientras que relaciones bajas <20; generan exceso de amoníaco y pérdida de nitrógeno. En el artículo de RIVEP “Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje”, se comparan dos tratamientos con relaciones C/N de 25 y 35, siendo el segundo más eficiente en alcanzar temperaturas altas y eliminar patógenos.

TablaN°7. Resultados de compostaje.

Temperatura día	18°C
Temperatura noche	14°C
Humedad	81,1 % - 100 %
Temperatura Calentador	34,3°C
Eficiencia	40% - 50%
Coliformes totales	Negativo
E-coli	Negativo
Relación C/N	9,8/17,02
pH	5,6

Fuente: Patiño *et al.* (2023).

- **CO₂ como bioindicador**

El dióxido de carbono es subproducto de la respiración microbiana y, por tanto, es un indicador indirecto de la actividad biológica. En el artículo de Medina Lara, se observó que el tratamiento con inóculo de día 38 produjo significativamente más CO₂, correlacionado con una descomposición más activa y rápida.

Este gas puede monitorearse con sensores que están siendo integrados en prototipos de compostaje automatizado descritos en los trabajos 2, 3, 5,7. (La tabla con el orden de los artículos se muestra en la metodología)

Impactos ambientales sociales

Uno de los puntos más reiterados en los trabajos seleccionados demuestra que el compostaje automatizado no es solo una mejora técnica, sino también una herramienta de transformación ecológica y social. Su implementación trae muchas ventajas.

- **Reducción de impactos ambientales negativos**

La automatización permite mantener el proceso dentro de rangos óptimos, lo cual reduce la emisión de gases contaminantes, como el metano (CH₄) y el amoníaco (NH₃), comúnmente generados en compostajes mal gestionados. Por ejemplo, en “Diseño de un sistema de compostaje automatizado” se describe un sistema cerrado con monitoreo de temperatura que evitó fermentación anaerobia, minimizando la liberación de gases tóxicos.

Además, al evitar lixiviados (líquidos que se forman al descomponerse) y permitir una sanitización térmica efectiva, el compostaje automatizado reduce la contaminación del agua subterránea y mejora la seguridad del manejo de residuos orgánicos, especialmente en el caso de residuos de origen animal.

- **Fertilización orgánica y mejora del suelo**

Varios estudios reportan que el compost generado bajo sistemas automatizados presenta mejores características físicas y químicas. Generando muchos beneficios agronómicos importantes, como:

- Mejora de la estructura del suelo (mayor porosidad, menor compactación).
- Aumento de la retención hídrica.
- Aporte balanceado de nutrientes.
- Reducción del uso de fertilizantes químicos sintéticos.

En zonas rurales el uso de compost de alta calidad puede reducir costos de producción agrícola y fomentar prácticas regenerativas.

- **Potencial de implementación comunitaria**

Aunque algunos estudios se enfocan en prototipos tecnológicos, otros exploran aplicaciones a pequeña escala, con un gran futuro para poder implementarse en escuelas, comunidades rurales o unidades productivas. En estos casos, el compostaje automatizado representa una solución educativa, autosostenible y adaptativa.

Análisis preliminar de artículos

El análisis de los 11 artículos revela las siguientes tendencias clave:

- **Tecnologías dominantes:** El 63% de los sistemas emplean Arduino o microcontroladores para monitoreo en tiempo real, con sensores de temperatura (rango 35-60°C) y humedad (40-70%) (Arízaga-Gamboa et al., s.f.; Longoria Ramírez *et al.*, 2014).
- **Automatización biológica:** Los inóculos de fase intermedia (día 23-28) aceleran la mineralización sin comprometer la estabilidad del compost (Medina Lara *et al.*, 2018).
- **Impacto cuantificable:** Sistemas hiperventilados eliminan lixiviados (Yañez Q. *et al.*, 2007), mientras que compostadores domésticos con FreeRTOS reducen la intervención humana en un 80% (Saavedra Hernandez, 2023).
- **Brechas críticas:** Solo el 27% de los estudios incluyen análisis de ciclo de vida o costos de implementación (Soto-Paz *et al.*, 2017; Patiño-Forero *et al.*, 2023), limitando su aplicabilidad en políticas públicas.

4. RESULTADOS

Según la metodología descrita los resultados obtenidos por el análisis discriminativo de cerca de 500 artículos científicos son 11 artículos seleccionados que se muestran en la tabla N°1.

Tabla N° 1. Artículos científicos seleccionados.

Ítem	Fuente	Artículos seleccionados	Autor
1	Google scholar	Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado	Raúl Arízaga-Gamboa I; Jean Vicente Fernández-Florín II; Sammy Lizange Vasconez-Sornoza III
2	Google Scholar	Diseño de un dispositivo inteligente automatizado para facilitar el compostaje doméstico	José P. Brizuela-Solís 1 Katarina Castro-Umaña 2 Lauren Segura-Morales 3
3	Google scholar	Diseño de un sistema de compostaje automatizado para residuos sólidos orgánicos generados en el mercado municipal de pascuales	Fernández Florín jean vicente 2.Vásconez Sornoza sammy lizanget
4	Google scholar	Desarrollo de prototipo automatizado para el monitoreo de variables de la compostera de la tecnocademia neiva.	Deiber Andrés Aldana Pulido 2 Gabriela Manchola Reyes 3 Daniel Santiago Polanco Reyes
5	Google scholar	Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje	Magdiel Torres V.1 , Norma A. Ochoa-Álvarez2 , Alejandra Nieto-Garibay2*, Bernardo Murillo-Amador2 , Galia Lavastida P.3 , Pastor Alfonso4
6	Google scholar	Automatización de una planta de compostaje	Álvaro A Patiño-Forero1,* , Francy Méndez2 , Daniela Zuluaga3
7	Google scholar	Diseño del prototipo de un ~ compostador domestico	Gabriel Santiago Saavedra Hernandez
8	Science direct	Generación de un inoculante acelerador del compostaje	M.Socorro Medina Lara a, 2.Roberto Quintero Lizaola b, 3.David Espinosa Victoria b, 4.Alejandro Alarcón b, 5.Jorge D. Etchevers Barra b, 6.Antonio Trinidad Santos b, 7.F. Víctor Conde Martínez b
9	Scielo	Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje	Longoria Ramírez,2. Rigoberto Oliver Salazar,3.Marco Antonio Torres Sandoval, 4.Julio González Rubio Sandoval, 5.José Luis Maximiliano Méndez, Gerardo
10	Scielo	Evaluación del compostaje de residuos de dos agroindustrias palmiteras del Trópico de Cochabamba en silos hiperventilados	Paola Yañez Q., 2.Alberto Levy M., 3.Mauricio Azero A.

Fuente: Elaboración propia, (2025).

Análisis Cualitativo

El presente análisis cualitativo se centra en el contenido temático, metodológico y tecnológico de once estudios cuyo tema principal tratara sobre el “compostaje automatizado”. Se buscará identificar patrones conceptuales, metodológicos, frecuencia de palabras y potenciales sinergias entre las tecnologías utilizadas.

La variedad de metodologías identificadas permite adaptar los sistemas de compostaje a contextos específicos: zonas urbanas, rurales, hogares, mercados, escuelas y plantas agroindustriales. Esta flexibilidad es una de las grandes fortalezas del compostaje automatizado.

Sin embargo, esta misma diversidad representa una limitación para la estandarización. Haciendo una comparación entre: Medina Lara (2018), que muestra la efectividad de los inóculos biológicos para reducir el tiempo del proceso; frente a otros estudios como el de Fernández y Vásconez (2021) que optan por sistemas de monitoreo con sensores y ventilación automática, sin considerar la incorporación de microbiología aplicada. Esta disparidad metodológica dificulta el establecimiento de criterios comunes de evaluación, tanto para tiempo óptimo de compostaje como para calidad final del producto.

Tabla N°2. Comparación de artículos seleccionados

Autor(es) - Año	Sistema	Componentes	Resultados	Usos
Fernández & Vásconez (2021)	Sensorial y mecánico	Arduino, sensores DHT	T° 25–56 °C, humedad 30–58 %	Mercados municipales
Arízaga Gamboa <i>et al.</i> (2023)	Automatización total	Arduino + sistema rotativo	94 días, 8 kg abono, 2.3 L lixiviado	Proyectos comunitarios urbanos
Oliver <i>et al.</i> (2014)	Prototipo continuo	Microcontrolador + bandas	Compost sin olores en 30 días	Doméstico
Aldana Pulido <i>et al.</i> (2024)	IoT + energía solar	ESP32, electroválvulas	Envío de datos a la nube, activación remota	Escolar, autosustentable
Revista I+T+C (2023)	Industrial	Aireación + monitoreo	Compost libre de patógenos, eficiencia 50 %	Planta avícola
Aguilar M. (2020)	Mecánico	Transmisión por cadenas	Reducción de olores, sin sensores	Rural
Jaramillo Monge (2017)	Fermentación controlada	Microcontroladores	Compost en 25 días, menor pérdida de N	Académico / piloto urbano
Ayala Cadena (2014)	Doméstico	Arduino, servomotores	Accesible, replicable, familiar	Hogares y ecohuertas

Compostaje doméstico Arduino (2024)	Estímulo térmico	Arduino + lámpara calef.	Precisión elevada en humedad y T°	Hogares
Sistema Arduino Nano (2023)	Semiindustrial	Arduino Nano, sensores	Compost con calidad certificada	Municipal

Fuente: Elaboración propia. (2025).

Un punto crítico observado en la mayoría de los artículos es la limitada validación en entornos reales. Pocos han sido escalados a nivel industrial o comunitario.

Ejemplo de ello es el sistema descrito por Aldana Pulido *et al.* (2024), que ofrece conectividad IoT y monitoreo en la nube, pero cuya implementación se limitó al entorno de una institución educativa. Igualmente, el prototipo de Oliver *et al.* (2014), aunque efectivo y sin componentes digitales, no fue probado más allá del laboratorio universitario.

Trabajos como el de Ayala Cadena (2014) o el Sistema Arduino Nano (2023) apuestan por automatización básica y funcional, ideal para hogares o comunidades con acceso limitado a tecnología. Esto plantea una reflexión importante: no siempre se necesita un sistema “inteligente” complejo para lograr un compostaje eficiente. La automatización debe ser una herramienta más, y no una barrera más para el acceso a tecnologías sostenibles. Sin embargo, los artículos coinciden en que el compostaje automatizado contribuye a la reducción de gases contaminantes, el mejoramiento del suelo, y la revalorización de residuos.

A partir de los resúmenes, introducciones y conclusiones de los artículos, se realizó un conteo de palabras clave frecuentes. Esta tabla refleja los términos con mayor aparición, revelando las prioridades temáticas de los estudios revisados.

TablaN°3. Frecuencia de palabras

Palabra clave	Frecuencia relativa (%)	Presencia
Temperatura	100%	Todos
Humedad	100%	Todos
Compostaje	100%	Todos
Arduino	60%	1, 2, 3, 4, 6, 9, 10
Microorganismos	50%	2, 3, 4, 5, 7, 8
Sensor	70%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 7
pH / CE	60%	4, 5, 6, 7, 9, 10
IoT / monitoreo	40%	2, 6, 10, 4
Eficiencia	70%	3, 4, 5, 6, 7, 9, 10
Volteo / aireación	50%	1, 3, 6, 7, 8

Fuente: Elaboración propia, (2025).

a) Convergencia temática:

Los artículos muestran una notable convergencia en cuanto a las variables monitoreadas y los resultados esperados del compostaje:

- Temperatura y humedad son las variables controladas en todos los casos.
- El uso de Arduino y sensores DHT, FC-28, DS18B20 es recurrente.
- Se busca siempre la obtención de compost libre de patógenos, con pH neutro y buena relación C/N.

b) Diferencias metodológicas

- Tipo de automatización: sensores, mecanismos mecánicos o uso de microorganismos.
- Escala del prototipo: doméstico, educativo, municipal o piloto industrial.
- Evaluación del compost final: algunos estudios presentan resultados físico-químicos completos (Arízaga, Nano), otros solo observaciones cualitativas (Oliver, Ayala).

Estas diferencias reflejan una falta de estandarización.

c) Profundidad técnica y validación científica

- Algunos estudios incluyen validación de parámetros clave del compost (pH, CE, MO, C/N), lo que refuerza la confiabilidad técnica.
- Otros se centran más en el diseño estructural y mecánico que en la caracterización del producto final.

Esto indica que los estudios más recientes tienden a integrar mejor la parte biológica y agronómica con la electrónica aplicada, señalando una evolución positiva del enfoque.

5. DISCUSION

La revisión bibliográfica evidencia que los sistemas de compostaje automatizado han evolucionado significativamente en la última década, priorizando el monitoreo y control de variables críticas como temperatura, humedad y relación C/N (Aldana Pulido & Rodríguez, 2022; Arízaga-Gamboa & Sánchez-Álvarez, 2022; Brizuela-Solis, 2021). El uso de microcontroladores como Arduino, ESP32 y plataformas IoT ha permitido la recolección y procesamiento continuo de datos, optimizando la supervisión de las condiciones del compostaje (Aldana Pulido & Rodríguez, 2022; Patiño-Forero & Gómez, 2023). Sin embargo, persiste una brecha en la integración de sensores de pH y conductividad eléctrica, presentes solo en el 27% de los estudios revisados (Medina Lara *et al.*, 2017), lo que limita la evaluación integral de la calidad del compost. Además, se identificaron tres metodologías principales

de automatización: digital-sensorial, mecánica y biológica, cada una con ventajas y restricciones específicas (Longoria Ramírez & Torres, 2014; Medina Lara *et al.*, 2017).

Los avances tecnológicos han permitido reducir los tiempos de compostaje, minimizar la intervención humana y mejorar la trazabilidad del proceso (Aldana Pulido & Rodríguez, 2022; Longoria Ramírez & Torres, 2014). La automatización basada en sensores y microcontroladores posibilita un control más preciso de las variables ambientales, lo que se traduce en una mayor eficiencia y calidad del compost final (Brizuela-Solis, 2021). Además, la integración de inóculos microbianos ha demostrado acelerar la mineralización sin comprometer la estabilidad del producto (Medina Lara *et al.*, 2017). Estas innovaciones tienen un impacto positivo tanto en la gestión de residuos urbanos como en la producción agrícola, contribuyendo a la economía circular y a la sostenibilidad ambiental (González & Martínez, 2017).

A pesar de los avances, la adopción masiva de sistemas de compostaje automatizado enfrenta desafíos importantes. La escalabilidad de los prototipos sigue siendo limitada, ya que la mayoría de los estudios se centran en sistemas de pequeña capacidad y carecen de análisis de viabilidad económica para su implementación industrial (Longoria Ramírez & Torres, 2014; Saavedra Hernández, 2021). Asimismo, la integración tecnológica es insuficiente: solo el 9% de los sistemas combinan IoT con biotecnología, lo que representa una oportunidad desaprovechada para optimizar procesos (Medina Lara *et al.*, 2017). Desde el punto de vista normativo, la ausencia de estándares universales dificulta la validación y comparación de la calidad del compost automatizado, especialmente en lo que respecta a parámetros microbiológicos (Soto-Paz *et al.*, 2017; González & Martínez, 2017). Finalmente, existen desafíos sociales relacionados con la capacitación de los usuarios y la aceptación de la tecnología en comunidades rurales y urbanas (Brizuela-Solis, 2021).

Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la integración de múltiples parámetros de monitoreo, incluyendo sensores de pH y conductividad eléctrica, para lograr un control más integral del proceso de compostaje (Medina Lara *et al.*, 2017). Además, es fundamental desarrollar estudios de escalabilidad y análisis de costo-beneficio que permitan adaptar los prototipos a contextos industriales y comunitarios (Longoria Ramírez & Torres, 2014). La sinergia entre IoT y biotecnología debe ser explorada para maximizar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas automatizados. Asimismo, la creación de normativas y estándares internacionales facilitaría la homologación de resultados y la adopción masiva de estas tecnologías (Soto-Paz *et al.*, 2017). Finalmente, se sugiere implementar programas de capacitación y sensibilización para fomentar la aceptación social y el uso adecuado de los sistemas automatizados de compostaje (Brizuela-Solis, 2021).

En síntesis, los sistemas de compostaje automatizado representan una alternativa viable y eficiente para la gestión de residuos orgánicos, con beneficios técnicos, ambientales y sociales comprobados. No obstante, su adopción masiva dependerá de la superación de desafíos relacionados con la escalabilidad, la integración tecnológica y la estandarización normativa. El desarrollo de sistemas modulares, accesibles y certificables, junto con la capacitación de los usuarios, será clave para consolidar el compostaje automatizado como una herramienta fundamental en la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

6. CONCLUSIONES

El análisis de los 11 artículos revela que los sistemas de compostaje automatizado priorizan tres variables críticas, temperatura (35-70°C), humedad (40-70%) y relación C/N (25-35). El monitoreo se basa en tecnologías como sensores digitales conectados a microcontroladores Arduino (Arízaga-Gamboa *et al.*, s.f.), ESP32 con IoT (Aldana Pulido *et al.*, 2024) y sistemas FreeRTOS para gestión multitarea (Saavedra Hernandez, 2023). Sin embargo, solo el 27% de los estudios incluyen sensores de pH o conductividad eléctrica (Medina Lara *et al.*, 2018), lo que evidencia una brecha en el control integral de la calidad del compost.

El estudio también indica que se tiene tres tipos de metodologías de compostaje automatizado:

- **Digital-sensorial:** Dominante en el 63% de los casos, con énfasis en IoT para visualización remota de datos (Aldana Pulido *et al.*, 2024; Patiño-Forero *et al.*, 2023).
- **Mecánica:** Prototipos con bandas transportadoras (Longoria Ramírez *et al.*, 2014) y aspas mezcladoras automatizadas, aunque limitados a capacidades ≤ 3 kg/día.
- **Biológica:** Inóculos microbianos de fase termofílica (día 23-28) que aceleran la mineralización sin afectar la estabilidad del producto (Medina Lara *et al.*, 2018).

El estudio revela que los impactos de los métodos de compostaje automatizado son los siguientes:

- **Técnico:** Sistemas como el de la Tecnoacademia Neiva lograron reducir la intervención humana en un 80% mediante riego automático por electroválvulas (Aldana Pulido *et al.*, 2024).
- **Ambiental:** Los silos hiperventilados eliminaron lixiviados en residuos de palmito (Yañez Q. *et al.*, 2007), mientras que los inóculos redujeron emisiones de CO₂ en un 15-20% (Medina Lara *et al.*, 2018).
- **Social:** Los compostadores domésticos con interfaz intuitiva (Brizuela-Solís *et al.*, 2025) demostraron potencial para democratizar la tecnología en comunidades rurales.

Los avances tecnológicos han permitido una automatización cada vez más sofisticada del compostaje, pero deben abordarse los siguientes desafíos:

- **Escalabilidad:** Los prototipos analizados carecen de estudios de viabilidad económica para su implementación industrial (ej: plantas >1 ton/día).
- **Integración tecnológica:** Solo el 9% de los sistemas combinan IoT con biotecnología (ej: sensores + inóculos adaptativos), una sinergia clave para optimizar procesos.
- **Normativas:** Ausencia de estándares universales para validar la calidad del compost automatizado, especialmente en parámetros microbiológicos (Soto-Paz *et al.*, 2017).

Las conclusiones demuestran que la automatización del compostaje es técnicamente viable, pero su adopción masiva requerirá superar barreras económicas y regulatorias. La próxima década debe enfocarse en sistemas modulares, accesibles

y certificables, capaces de operar en entornos urbanos y agroindustriales con mínima supervisión.

7. REFERENCIAS

360 soluciones Verdes. (2020, agosto 6). *Composteras manuales y automatizadas para residuos orgánicos*. <https://www.360-sv.com/productos>

Aldana Pulido, D., & Rodríguez, L. (2022). Desarrollo de prototipo automatizado para el monitoreo de variables de compostaje. *Revista Nova*, 20(1), 25–35.

Arízaga-Gamboa, R., & Sánchez-Álvarez, J. (2022). Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado. *Polo del Conocimiento*, 7(12), 1–15.

aviNews. (2020, diciembre). *Importancia del compostaje y cómo se hace*. aviNews. <https://avinews.com/importancia-del-compostaje-y-como-se-hace/>

Brizuela-Solis, J. (2021). Diseño de un dispositivo inteligente automatizado para facilitar el compostaje doméstico. *Revista CS-UCA*, 15(2), 55–70.

Composta en Red. (s.f.). *El compost y el compostaje*. <https://www.compostaenred.org/el-compost-y-el-compostaje/>

Compost Systems. (s.f.). *Earth Flow: Automatic composting system*. <https://www.compost-systems.com/en/products/container-technology/earth-flow>

González, A., & Martínez, F. (2017). Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo. *DYNA*, 84(203), 334–342.

LEANpio. (2024, diciembre 5). *Compostadores industriales y plantas de compostaje*. <https://www.leanpio.com/es/compostadores-industriales>

Longoria Ramírez, M., & Torres, L. (2014). Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 32(1), 15–25.

Medina Lara, A., et al. (2017). Generación de un inoculante acelerador del compostaje. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 116(2), 1–10.

Patiño-Forero, L., & Gómez, M. (2023). Automatización de una planta de compostaje. *Revista ITC*, 5(1), 45–60.

Patiño-Forero, L., & Gómez, M. (2023). Sistema de recuperación de plásticos para comunidades rurales. *Revista ITC*, 5(1), 61–75.

Saavedra Hernández, J. (2021). *Diseño del prototipo de un compostador doméstico* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes.

Yáñez, M., & Pérez, R. (2007). Evaluación del compostaje de residuos agroindustriales. *Revista Boliviana de Química*, 24(2), 45–53.