



Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Laura Sofia Holguin Giraldo
Samuel Alejandro Cardozo Martínez
Eliana Sulay Anzola Poveda

Universidad Ean
Facultad
Ingeniería Mecatrónica
Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
4/06/2026

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Laura Sofia Holguin Giraldo
Samuel Alejandro Cardozo Martínez
Eliana Sulay Anzola Poveda

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Mecatrónico

Ingeniero Ambiental

Director (a):

Nombre completo del director(a)

Universidad Ean
Ingeniería Mecatrónica
Ingeniería Ambiental

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos
Bogotá, Colombia

4/06/2026

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 4/06/2026

RESUMEN

El compostaje de residuos orgánicos sólidos agrícolas es una alternativa sostenible para el aprovechamiento de subproductos biodegradables y la reducción del impacto ambiental generado por los residuos agroindustriales. Sin embargo, en pequeños y medianos sistemas agrícolas, este proceso suele realizarse sin control de variables críticas, afectando la estabilidad y calidad del compost obtenido. Frente a esta problemática, el presente estudio tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema de monitoreo distribuido para el seguimiento de variables fisicoquímicas durante el proceso de compostaje agrícola.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo-correlacional y diseño no experimental longitudinal. Inicialmente, se realizó una revisión sistemática de literatura siguiendo la metodología PRISMA, mediante la consulta de bases de datos científicas entre 2020 y 2026, permitiendo identificar tendencias, tecnologías y vacíos de conocimiento relacionados con el monitoreo del compostaje. Posteriormente, se diseñó un sistema basado en microcontroladores ESP32 y sensores para medir temperatura, humedad y gases en diferentes puntos del material compostado.

Los resultados evidenciaron que el monitoreo continuo permite identificar variaciones dentro del sistema, facilitando el análisis del comportamiento térmico y de humedad durante las distintas fases del compostaje. Y observando que la implementación de la medición distribuida mejora la obtención de datos y contribuye a detectar condiciones que pueden afectar la eficiencia del proceso.

Palabras clave: compostaje agrícola, monitoreo continuo, temperatura, humedad, ESP32, residuos orgánicos.

ABSTRACT

Agricultural composting of solid organic waste is a sustainable alternative for the utilization of biodegradable by-products and the reduction of the environmental impact generated by agro-industrial waste. However, in small and medium-sized agricultural systems, this process is often carried out without controlling critical variables, which affects the stability and quality of the resulting compost. To address this issue, the present study aimed to design and implement a distributed monitoring system for tracking physicochemical variables during the agricultural composting process.

The research was conducted using a quantitative approach, with a descriptive-correlational scope and a longitudinal non-experimental design. Initially, a systematic literature review was carried out following the PRISMA methodology, through the consultation of scientific databases covering the period from 2020 to 2026. This review made it possible to identify trends, technologies, and knowledge gaps related to composting monitoring. Subsequently, a system based on ESP32 microcontrollers and sensors was designed to measure temperature, humidity, and gases at different points within the composted material.

The results showed that continuous monitoring makes it possible to identify variations within the system, facilitating the analysis of thermal and moisture behavior throughout the different composting stages. Furthermore, the implementation of distributed measurement improved data collection and contributed to the detection of conditions that may affect process efficiency.

Keywords: agricultural composting, continuous monitoring, temperature, humidity, ESP32, organic waste.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente esencial del medio ambiente y de los sistemas productivos agrícolas, ya que sustenta la vida de plantas, microorganismos y fauna edáfica, regula el ciclo hidrológico y participa en la captura de carbono, contribuyendo al equilibrio climático global (Deiss, 2023; Noticias ONU, 2020). En Colombia, los suelos presentan una amplia diversidad asociada a variaciones geomorfológicas y climáticas, incluyendo entisoles, inceptisoles, ultisoles y oxisoles, cada uno con características fisicoquímicas particulares que determinan su capacidad para sostener ecosistemas productivos específicos. Esta estabilidad intrínseca se ve crecientemente amenazada debido a las prácticas agrícolas contemporáneas.

En este sentido, Muñoz-Morales et al. (2024) vinculan la degradación progresiva de estos suelos con el uso intensivo de fertilizantes sintéticos y prácticas de manejo convencional que reducen la materia orgánica. Este deterioro afecta directamente la resiliencia de los sistemas agrícolas, evidenciando la necesidad de implementar soluciones que permitan la vitalidad biológica a la tierra. El compostaje es método fundamental de mejora del suelo el cual mediante un proceso biológico aerobio se obtiene la descomposición controlada de residuos biodegradables, como restos de comida, hojas, césped y otros desechos vegetales este proceso es llevado a cabo por microorganismos como bacterias y hongos, transformando los residuos en una sustancia rica en nutrientes que se utiliza como abono natural y mejora la fertilidad del suelo (FAO,2022).

Para ello la efectividad del compostaje como herramienta de restauración depende de la gestión precisa de las fases de transformación biológica. De acuerdo con BBVA (2025), el proceso debe transitar por etapas mesófilas y termófilas para garantizar la eliminación de patógenos y la estabilidad de los nutrientes. En la práctica de pequeña y mediana escala este ciclo se ve afectado por falta de supervisión técnica, lo que convierte un método eficiente en un proceso de resultados inciertos.

Según Haug (2018), variables como la temperatura y la disponibilidad de oxígeno actúa como indicadores críticos de la actividad microbiana; por lo tanto, su desconocimiento impide realizar ajustes operativos oportunos. Actualmente, la literatura técnica asocia el éxito del compostaje con el control de estos parámetros, pero existe una brecha en el acceso a herramientas de medición. Autores como Lazrak et al. (2025) proponen el uso de inteligencia artificial para predecir la

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

madurez del compost, estos sistemas suelen ser costosos, y el productor local carece de sistemas que le permitan interpretar la dinámica de sus residuos. Por esta razón, Muntean et al. (2021) resaltan la importancia de diseñar dispositivos de monitoreo que traduzcan los fenómenos biológicos en datos técnicos accesibles, permitiendo así una optimización real de proceso a bajo costo.

¿Puede la implementación de un sistema de monitoreo distribuido de variables mejorar el control operativo y la eficiencia del proceso de compostaje?

Como respuesta a esta necesidad de tecnificación accesible, la propuesta se materializa en el diseño de un Sistema de Monitoreo Distribuido, un prototipo mecatrónico basado en el microcontrolador ESP32 y programado en el entorno Arduino IDE. El sistema integra una tarjeta de circuito impreso (PCB) diseñada a medida, que coordina una red de sensores compuesta por sondas de temperatura DS18B20, sensores de gases MQ-135 y módulos de humedad del suelo, permitiendo un registro constante de la dinámica física y química de los residuos.

Para facilitar la interacción con el usuario, el dispositivo cuenta con una pantalla integrada que permite la visualización inmediata de las variables. Complementariamente, los datos son transmitidos a un software de interpretación desarrollado para el análisis y la representación gráfica de los resultados, transformando los fenómenos biológicos en información técnica procesable. Este enfoque sustituye la gestión empírica por un seguimiento preciso de bajo costo, facilitando la obtención de un fertilizante orgánico de buena calidad mediante la toma de decisiones basada en datos reales y verificable.

PROPOSITO DE LA INVESTIGACION

El propósito de la presente investigación es proporcionar a los pequeños y medianos agricultores una herramienta que les permita medir en tiempo real la calidad de su compostaje con el fin de verificar la calidad y tomar medidas correctivas durante desvíos críticos en las variables críticas de compostaje, contando con un procesamiento de variables de forma centralizada y remota

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
PROPOSITO DE LA INVESTIGACION.....	8
OBJETIVOS.....	9
GENERAL.....	9
ESPECÍFICOS.....	9
MARCO TEÓRICO	9
VARIABLES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	10
CONTROL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	12
TECNOLOGÍAS DE MONITOREO APLICADAS AL COMPOSTAJE	12
FASES DE DESARROLLO	13
PRISMA.....	17
DISEÑO DE LA REVISIÓN	18
ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA	18
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN	18
FLUJO DE SELECCIÓN (PRISMA)	19
ANÁLISIS CRÍTICO Y COMPARATIVO DE ESTUDIOS SELECCIONADOS	20
Tendencias identificadas.....	21
VACÍOS DE CONOCIMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	21
METODOLOGÍA	23
ENFOQUE Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	24
INSTRUMENTOS	25
TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	27
FASES DEL PROCESO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	29
RESULTADOS.....	31
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
PLAN DE DIVULGACIÓN	42
CONCLUSIÓN	44

BIBLIOGRAFIA.....	46
-------------------	----

OBJETIVOS

GENERAL

Elaborar una propuesta de prototipo de un sistema de monitoreo distribuido para la supervisión de variables críticas en el proceso de compostaje mediante hardware de bajo costo.

ESPECÍFICOS

- Desarrollar un sistema basado en ESP32 que integre sensores de temperatura, humedad y gases en tiempo real.
- Evaluar el desempeño del sistema piloto mediante pruebas de campo, mediante el análisis comparativo entre la precisión de los sensores y los valores teórico de referencia, junto con la correlación de los datos obtenidos frente a la evolución física del compostaje

MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico desarrolla los fundamentos conceptuales que sustentan el sistema propuesto, organizados en cuatro ejes temáticos: las variables del proceso de compostaje, el control operativo de dicho proceso, las tecnologías de monitoreo disponibles a nivel global, los sistemas de biorreactores como referente de control avanzado aplicable a contexto de menor escala además de las fases y capas de desarrollo.

El compostaje de residuos orgánicos agrícolas constituye una alternativa para el aprovechamiento de subproductos generados en sistemas productivos, permitiendo su transformación en un material estabilizado que puede ser reincorporado al suelo. En pequeños y medianos sistemas agrícolas en Colombia, este proceso se realiza generalmente sin control técnico de las condiciones operativas, lo que limita su eficiencia y genera variabilidad en la calidad del producto final. Esta situación evidencia la necesidad de comprender y medir las variables que interviene en el proceso, orientando el desarrollo de herramientas tecnológicas que permitan su seguimiento sistemático y análisis.

VARIABLES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es un proceso biológico aerobio en el que la degradación de la materia orgánica depende de variables medibles como la temperatura, la humedad, la concentración de oxígeno y la relación carbono/nitrógeno. Según Haug (2018), la temperatura permite identificar las fases del proceso y evaluar la actividad microbiana, mientras que la humedad y la aireación condicionan el desarrollo de los microorganismos responsables de la descomposición.

Zhang et al. (2012) describen mediante un modelo matemático que la velocidad de degradación depende de la interacción entre estas variables, lo que permite analizar el compostaje como un sistema dinámico cuantificable. En este sentido, la posibilidad de medir dichas variables resulta fundamental para comprender el comportamiento del proceso y detectar posibles desviaciones en su desarrollo.

De manera complementaria, Martins et al. (2023) evidencian que los cambios en parámetros como el pH, la temperatura y la actividad bacteriana se relacionan con la estabilidad del compost, lo que refuerza la necesidad de hacer mediciones continuas para evaluar su evolución en el tiempo. La Tabla 1 Variables críticas del proceso de compostaje, función y sensores asociados

Tabla 1

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Variables óptimas y sensores asociados para el monitoreo del proceso de compostaje

variable	Rango optimo	Función en el proceso	Sensor asociado
Temperatura	45 – 65 °C (fase termófila)	Principal indicador de la actividad microbiana; garantiza la eliminación de patógenos y semillas de malezas durante la fase termófila. Su monitoreo continuo permite identificar el tránsito entre fases del proceso.	DS18B20 ($\pm 0,5$ °C; rango –55 a 125 °C)
Humedad	50-60%	Condición indispensable para el metabolismo de los microorganismos descomponedores. Valores superiores al 60 % generan condiciones anaerobias; inferiores al 40 % inhiben la actividad microbiana.	Sensor capacitivo de suelo
Oxígeno/CO ₂	Oxígeno > 10% CO ₂ y NH ₂ variables	Indicadores del estado aerobio y de la pérdida de nitrógeno del sistema. Concentraciones elevadas de NH ₃ señalan desequilibrios en la relación C/N; el CO ₂ refleja la intensidad de la respiración microbiana.	MQ-135 (CO ₂ , NH ₃ , gases mixtos)
Relación C/N	25:1 -30:1 (inicial); 15:1 – 20:1 (madurez)	Determina la velocidad de degradación de la materia orgánica y la calidad final del compost. La disminución progresiva de la relación C/N es el indicador químico más aceptado de madurez del material.	Medición indirecta
pH	6,5 – 8,0	Refleja el estado de la actividad química y microbiológica del compost. Valores fuera del rango óptimo inhiben la actividad	

		enzimática y alteran la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos.	
--	--	--	--

Nota. Esta tabla muestra los rangos óptimos del proceso de compostaje incluyendo la etapa en la que este se encuentre, así como información sobre su importancia y que sensores son útiles para medirlas, tomando información basada en Lazrak et al. (2025).

CONTROL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El control del compostaje se basa en la regulación de las condiciones que afectan la actividad microbiana. Wang et al. (2023) proponen un modelo cinético que permite optimizar el proceso mediante el análisis de la temperatura y la tasa de degradación, estableciendo criterios técnicos para determinar momentos adecuados de intervención, como el volteo del material.

Este enfoque permite entender que el control del proceso no depende únicamente de la experiencia del operador, por el contrario de la interpretación de datos medibles que reflejan el estado del sistema. En ausencia de medición, estas decisiones se realizan de forma empírica, lo que puede generar ineficiencias en el proceso. Por tanto, la incorporación de mecanismos de seguimiento de variables se convierte en un elemento clave para mejorar el control y la estabilidad del proceso de compostaje.

TECNOLOGÍAS DE MONITOREO APLICADAS AL COMPOSTAJE

A nivel global, el monitoreo del compostaje ha evolucionado desde la inspección visual y manual hacia sistemas instrumentados que integran sensores electrónicos, plataformas de adquisición de datos y, más recientemente, algoritmos de inteligencia artificial. Las tecnologías documentadas que mejores resultados han dado en el sector agrícola actualmente se encuentran los sensores de temperatura tipo termopar y termistores, los sensores electroquímicos para detección de gases (CO₂, NH₃, O₂), los sensores de humedad capacitivos y resistivos, y los sistemas de transmisión inalámbrica basados en protocolos como ZigBee, LoRa y WiFi, además de sistemas de automatización y control de la aireación forzada, modelos de circuito de monitoreo y sistemas de compostaje cerrado trabajando en conjunto con aplicaciones móviles, que han evidenciado una optimización de recolección de datos y de variables críticas en el proceso de compostaje y una

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

mejora considerable del mismo gracias a la corrección del entorno basada en el monitoreo constante Veizaga Balta, W., Vega Torrejón, G., & Colque Ayaviri, J. C. (2025). Estas soluciones han sido implementadas tanto en instalaciones industriales de gran escala como en prototipos de bajo costo orientados a contextos rurales o de pequeña producción.

En esta línea, Liu et al. (2026) desarrollan un sistema que integra sensores de temperatura, humedad y gases con modelos de análisis de datos, posibilitando la optimización del proceso mediante el control predictivo sustentado en información continua. Por su parte, Muntean et al. (2021) demuestran la viabilidad técnica de sensores de bajo costo para el monitoreo ambiental, evidenciando que es posible implementar sistemas de medición accesible sin necesidad de infraestructura tecnológica compleja. La utilización de este tipo de dispositivos facilita la recolección de datos en distintos puntos del material en proceso, permitiendo obtener una representación más fiel y distribuida de su comportamiento.

La aplicación de estas tecnologías permite reducir sustancialmente la incertidumbre inherente al proceso de compostaje, al transformar variables que tradicionalmente se estimas de forma empírica en datos medible, analizables y utilizables para la toma de decisiones técnicas fundamentadas.

FASES DE DESARROLLO

Fase 1. Selección de variables

En esta fase se investiga acerca del proceso de compostaje, así como el funcionamiento interno que genera cada estado de este. Las variables principales incluyen temperatura, humedad, pH y gases como CO₂. Estas variables permiten evaluar la actividad microbiológica y el estado del compost y al mismo tiempo los establece rangos óptimos para cada proceso del compostaje

Aldana et al. (2024) destaca que el monitoreo continuo de estas variables permite mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del compost, mientras que Veizaga et al. (2024) resaltan la importancia de medir múltiples puntos del mismo sistema para capturar la heterogeneidad del sistema.

Fase 2. Replica de compostaje agrícola

Durante esta fase se realiza una réplica de un compostaje agrícola, en la que se medirán las variables más importantes del proceso de compostaje simulando los métodos tradicionales

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

utilizados en la actualidad por pequeños y medianos agricultores, siguiendo guías técnicas como el agrosavia (Díaz et al., 2024) correlacionando la información tomada durante la primera fase con valores reales.

Fase 3. Diseño del sistema de monitoreo

En esta fase se define la arquitectura conceptual y funcional del sistema, identificando las variables críticas del proceso de compostaje, principalmente la temperatura y la humedad, debido a su influencia directa en la actividad microbiana y la eficiencia del proceso de compostaje (Haug, 2018). Asimismo, se establecen los rangos de operación óptimos para garantizar condiciones adecuadas de degradación (Bernal et al., 2009).

De acuerdo con lo anterior el diseño del sistema de monitoreo se ejecuta cumpliendo las capas de desarrollo que garantizan una adecuada construcción del modelo.

CAPAS DE DESARROLLO

1. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico es la base fundamental del prototipo, esto debido a que nos permite garantizar un orden dentro del prototipo permitiendo una correcta comunicación entre los componentes y por lo tanto una buena toma y transmisión de datos además de que cada componente mantenga una alimentación estable en especial los sensores de monitoreo distribuidos por diversos puntos. En sistemas aplicados a entornos agroindustriales, la estabilidad energética es un factor para tener en cuenta ya que un fallo aquí puede significar menor tiempo de carga del prototipo o incluso el fallo de algún componente por sobrecarga comprometiendo la continuidad en la adquisición de datos y así evitar pérdidas de información.

La simulación eléctrica previa mediante herramientas especializadas permite optimizar el diseño y reducir fallos en sistemas IoT de monitoreo ambiental (Deshpande et al., 2022). En este contexto, el uso de Flux una plataforma diseñada para crear y simular circuitos eléctricos posibilita modelar el comportamiento eléctrico del sistema, permitiendo analizar la distribución de corriente, la eficiencia energética y las posibles pérdidas.

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Esta capa permite anticipar riesgos como sobrecargas, caídas de tensión o interferencias, especialmente relevantes en ambientes de compostaje caracterizados por humedad elevada, altas temperaturas y condiciones variables.

Adicionalmente, Prabowo y Irwanto (2023) destacan que los sistemas basados en microcontroladores requieren arquitecturas eléctricas optimizadas para garantizar su desempeño en escenarios distribuidos, donde múltiples nodos operan al mismo tiempo y permiten darnos una idea de los componentes y estructura del prototipo.

El prototipo funciona por medio de un sistema de monitoreo distribuido basado en un microcontrolador ESP32 DevKit, el cual se coordina con todos los sensores para tomarlos datos al mismo tiempo. Se incorporaron sensores de temperatura Dallas DS18B20 y un sensor de humedad capacitivo V1.2, un sensor de CO₂ MQ-135 distribuidos dentro del sistema para mediciones continuas, confiables y de bajo costo validando la viabilidad técnica del monitoreo

2. Programación basada en el lenguaje Arduino

La capa de programación se fundamenta en la implementación de un código en el lenguaje de programación Arduino, el cual se encarga de calibrar cada sensor para tomar cada medida en su unidad correcta y disminuir la tasa de error de cada sensor permitiendo capturar en tiempo real las variables críticas del proceso de compostaje.

El uso del lenguaje de programación de Arduino es oportuno para trabajar con microcontroladores en tareas de adquisición y comunicación de datos, principalmente por su facilidad de uso y compatibilidad directa con múltiples bibliotecas. Además, microcontroladores como la esp32 que utilizamos que integran una conexión por medio de Wi-Fi y Bluetooth, resultan mucho más fáciles de usar gracias a la gran cantidad de librerías disponibles en Arduino, facilitando la transmisión de datos a servidores, APIs o plataformas IoT en tiempo real. Según Espressif Systems (2023), el soporte oficial de Arduino permite desarrollar aplicaciones IoT de forma rápida y eficiente; asimismo existen trabajos que destacan la facilidad de implementación de redes y sensores usando Arduino sobre ESP32. Siendo una base sólida con facilidad de uso, capacidad técnica y rapidez de desarrollo, ideal para proyectos de monitoreo y adquisición de datos.

3. Procesamiento y almacenamiento de datos

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Una vez transmitidos, los datos son procesados y almacenados en plataformas digitales, en específico Thingspeak. Una plataforma de IoT basada en la nube, que permite a los usuarios recopilar, visualizar y analizar flujos de datos en tiempo real transformando los datos en información útil para la toma de decisiones, así como gráficos que pueden ayudar al usuario a identificar en qué momento pudo ocurrir algún suceso importante durante el proceso, ayudando a identificar problemas en el sistema, patrones, tendencias y anomalías en el proceso de compostaje. Permitiendo un análisis histórico de las variables modelos predictivos y optimización del proceso.

Según estudios recientes, la analítica de datos en sistemas IoT permite mejorar significativamente la eficiencia de procesos ambientales (Prabowo & Irwanto, 2023).

Permite a los operadores comprender el estado del sistema y tomar decisiones informadas y así activar acciones correctivas como ventilación, riego o ajuste de condiciones, optimizando el proceso de compostaje.

Fase 4. Seguimiento y análisis del proceso de compostaje

En la segunda fase se implementa el sistema dentro de un prototipo funcional de compostaje, asegurando condiciones operativas controladas incluyendo la adecuada aireación del sistema, la correcta disposición del material orgánico y la estabilidad estructural del prototipo, factores que influyen en la eficiencia del proceso de biodegradación (Domanovac et al., 2024).

Seguido de un monitoreo continuo del proceso, mediante el registro de datos en los distintos puntos de medición definidos previamente.

PRISMA**DISEÑO DE LA REVISIÓN**

El presente estado del arte se desarrolló mediante una revisión sistemática estructurada siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el fin de garantizar transparencia, trazabilidad y replicabilidad en la identificación y selección de literatura científica relevante. El objetivo fue analizar investigaciones publicadas entre 2020 y 2026 relacionadas con sistemas de monitoreo aplicados al compostaje y al control de variables fisicoquímicas en procesos biológicos similares.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Bases de datos consultadas: Scopus, Web of Science (WOS), ScienceDirect y IEEE Xplore

Periodo temporal cubierto: enero de 2020 – febrero de 2026.

Idiomas considerados: inglés y español.

Tipo de documento: artículos de investigación revisados por pares.

Ecuación de búsqueda empleada:

(“composting” OR “aerobic biodegradation”) AND (“monitoring system” OR “sensor-based” OR “distributed sensing” OR “data acquisition”) AND (“temperature” OR “moisture” OR “physicochemical variables”)

Se aplicaron filtros por año, área temática (ingeniería ambiental, agricultura, ciencias ambientales) y tipo de documento.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Criterios de inclusión:

- Publicación entre 2020–2026.
- Revista indexada en Scopus o WOS.

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

- Implementación experimental de sensores o sistemas de monitoreo.
- Enfoque en compostaje aerobio o procesos biológicos comparables.
- Análisis de variables fisicoquímicas relevantes.

Criterios de exclusión:

- Revisiones narrativas sin implementación experimental.
- Estudios exclusivamente enfocados en digestión anaerobia para producción de biogás.
- Artículos sin medición instrumental real.
- Publicaciones duplicadas o sin acceso a texto completo.

FLUJO DE SELECCIÓN (PRISMA)

Registros identificados en bases de datos: 156

Registros tras eliminación de duplicados: 129

Registros evaluados por título y resumen: 129

Registros excluidos por irrelevancia temática: 91

Artículos evaluados a texto completo: 38

Artículos excluidos tras lectura completa (no cumplían criterios metodológicos): 30

Estudios incluidos en análisis cualitativo final: 8

Estudios seleccionados para análisis comparativo detallado: 4

Las principales razones de exclusión fueron: ausencia de sistema de monitoreo real, enfoque exclusivamente anaerobio o falta de datos experimentales verificables.

ANÁLISIS CRÍTICO Y COMPARATIVO DE ESTUDIOS SELECCIONADOS

5.1 Lazrak et al. (2025)

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Publicaron en Waste Management Bulletin un estudio sobre compostaje en reactor conectado con sensores integrados y modelado predictivo basado en inteligencia artificial. Implementaron monitoreo continuo de temperatura, humedad y gases, demostrando reducción del tiempo de maduración y mejora en la estabilidad térmica. Limitación principal: alta dependencia tecnológica y costos elevados, lo que dificulta su replicabilidad en pequeña escala agrícola.

5.2 Domanovac (2024)

En Processes, desarrolló el diseño parametrizado de un reactor aerobio con modelación de balances de masa y energía. El estudio resalta la importancia del control de aireación y temperatura para mantener estabilidad metabólica. Limitación: no implementa medición distribuida interna; el monitoreo se concentra en variables globales del reactor.

5.3 Zhang et al. (2022)

En Waste Management, evaluaron la optimización del compostaje mediante control de humedad y aireación con sensores térmicos internos. Identificaron gradientes térmicos significativos dentro de la pila que afectan la eficiencia global. Limitación: número reducido de puntos de medición y ausencia de sistema automatizado de almacenamiento continuo.

5.4 Muntean et al., 2021

En Sensors, desarrollaron una red de sensores de bajo costo para monitoreo ambiental agrícola. Demostraron alta precisión y confiabilidad en mediciones de temperatura y humedad mediante microcontroladores accesibles. Limitación: no aplicado específicamente a compostaje, aunque tecnológicamente adaptable.

Tendencias identificadas

El análisis comparativo evidencia las siguientes tendencias en la literatura científica reciente:

Integración creciente de sensores digitales y análisis de datos en tiempo real.

Incorporación de modelos predictivos basados en inteligencia artificial.

Predominio de sistemas cerrados o experimentales de escala controlada.

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Escasa investigación orientada a pequeña escala rural con recursos limitados.

Metodológicamente, los estudios combinan experimentación directa con análisis estadístico y modelación matemática, aunque pocos abordan la heterogeneidad espacial mediante monitoreo distribuido múltiple.

VACÍOS DE CONOCIMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

A partir de la revisión sistemática se identifican brechas claras:

Falta de sistemas de monitoreo distribuidos adaptados a pilas abiertas o semiconfinadas.

Escasa aplicación en residuos agrícolas específicos de contextos latinoamericanos.

Limitado análisis del impacto del monitoreo en la estabilidad dinámica del proceso, más allá de la predicción de madurez.

Poca integración entre instrumentación de bajo costo y evaluación técnica rigurosa.

El proyecto actual se posiciona frente a estos vacíos al proponer un sistema de medición distribuida aplicado a residuos agrícolas colombianos, con énfasis en análisis dinámico y estabilidad del proceso.

Tabla 2 Comparación de estudios seleccionados

Autor(es) / Año	Título del estudio	Objetivo principal	Metodología empleada	Variables analizadas	Principales hallazgos	Limitaciones reportadas	Relación con el proyecto actual
Lazrak et al., 2025	AI-driven composting in connected bioreactor	Predecir madurez y calidad mediant	Reactor cerrado con monitoreo continuo y	Temperatura, humedad, gases	Reducción del tiempo de proceso	Alto costo e infraestructura compleja	Evidencia impacto del monitoreo continuo

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

		e sensores e IA	modelado predictivo		y mayor estabili dad		
Domano vac, 2024	Design of a bioreactor for aerobic biodegrad ation	Paramet rizar proceso aerobio mediant e balances	Modelación matemática y diseño experimental	Tempera tura, O ₂ , tasa degradac ión	Estabili dad térmica asociad a a control de aireació n	Sin monitore o distribuid o interno	Aporta fundament os de control y parametriz ación
Zhang et al., 2012)	Modellin g of organic matter dynamics during the composti ng process	Evaluar influenc ia de humeda d y aireació n	Sensores térmicos internos y análisis experimental	Tempera tura, humedad	Gradien tes térmico s afectan eficienc ia	Pocos puntos de medición	Justifica medición distribuida
Muntea n et al., 2021	Low-cost environm ental sensor networks	Evaluar red de sensores agrícola s de bajo costo	Implementac ión IoT con microcontrol adores	Tempera tura, HR	Alta precisió n y bajo costo	No aplicado a composta je	Demuestra posible viabilidad tecnológic a en entornos rurales

Descripción de la tabla

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

La Tabla 2 sintetiza los elementos metodológicos y técnicos clave de los estudios seleccionados. Permite identificar coincidencias en variables analizadas (temperatura y humedad), diferencias en escala de implementación (industrial vs. experimental vs. agrícola), y limitaciones metodológicas relacionadas con costo, aplicabilidad o falta de medición distribuida. Esta comparación facilita la identificación de la brecha científica específica que el presente proyecto busca abordar: el desarrollo de un sistema de monitoreo distribuido, técnicamente fundamentado y adaptado a condiciones agrícolas reales.

METODOLOGÍA

ENFOQUE Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, orientado a la medición, análisis y validación del comportamiento de variables físicas y químicas en el proceso de compostaje, particularmente temperatura y humedad, las cuales han sido identificadas como determinantes en la evolución del proceso según Martins et al. (2023) y Wang et al. (2023). Este enfoque permite evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo mediante datos experimentales, facilitando la identificación de patrones, relaciones entre variables y condiciones de estabilidad del proceso.

La investigación es de tipo aplicada, debido a que busca abordar la problemática asociada a la ausencia de monitoreo técnico en sistemas de compostaje de pequeña y mediana escala agrícola. Presenta un alcance descriptivo-correlacional, ya que no se manipulan directamente las variables del proceso, más bien se observa en su comportamiento natural, estableciendo relaciones entre ellas. El diseño es no experimental y longitudinal, dado que las variables se registran de manera continua durante el desarrollo del proceso, permitiendo analizar su evolución en el tiempo, en concordancia con enfoques utilizados en sistemas de monitoreo ambiental basados en sensores (Muntean et al., 2021).

La muestra utilizada en la investigación corresponde a un prototipo de compostaje elaborado a partir de residuos orgánicos agrícolas generados en entornos de pequeña producción. Para la conformación del sistema se utilizaron materiales orgánicos biodegradables de origen vegetal, seleccionados por su disponibilidad y representatividad dentro de procesos de compostaje agrícola comunes en contextos rurales colombianos.

El tipo de muestreo será no probabilístico por conveniencia, debido a que la selección de los residuos orgánicos y del entorno de implementación se realizó considerando la disponibilidad de materiales, accesibilidad y viabilidad técnica para el desarrollo del prototipo. Siendo muy útil para una investigación donde el objetivo principal no es la generalización estadística sino la evaluación funcional del sistema en condiciones reales de operación.

Para la toma de datos se establecieron múltiples puntos de medición distribuidos estratégicamente dentro del material en proceso de compostaje, con el propósito de registrar la variabilidad espacial

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

y temporal de las variables monitoreadas. Los sensores de temperatura y humedad realizaron mediciones continuas durante las distintas fases del compostaje, permitiendo generar registros que facilitan el análisis del comportamiento del sistema.

INSTRUMENTOS

Para la recolección de información se emplean instrumentos orientados al registro, control y evaluación del proceso. Se utiliza un sistema de monitoreo basado en sensores de temperatura y humedad de bajo costo, integrados a un sistema de adquisición de datos que permite registrar y almacenar la información de manera continua, cuya aplicabilidad ha sido demostrada en sistemas de monitoreo ambiental (Muntean et al., 2021).

Se implementa un formato de registro experimental estructurado que permite documentar de manera organizada las mediciones obtenidas, asegurando consistencia en la toma de datos. Adicionalmente, se emplea una bitácora de seguimiento para registrar eventos relevantes durante el desarrollo del proceso, como intervenciones sobre el material, ajustes operativos y comportamientos atípicos, lo que permite contextualizar las variaciones observadas en las mediciones.

El sistema de compostaje funciona como instrumento experimental controlado, en el cual se utilizan residuos orgánicos definidos y se mantiene un seguimiento durante un periodo específico, generando los datos necesarios para evaluar el comportamiento del sistema. Complementariamente, se realiza observación directa del material, considerando características como color, olor y textura, con el fin de relacionar condiciones físicas con los datos registrados, en coherencia con los cambios fisicoquímicos descritos durante el compostaje (Martins et al., 2023).

Se establece una matriz de evaluación para analizar el desempeño del sistema en función de criterios como estabilidad térmica, comportamiento de la humedad y uniformidad del proceso, permitiendo relacionar los resultados obtenidos con los objetivos de la investigación.

Variables

El proceso de compostaje es una descomposición biológica controlada donde microorganismos transformando residuos orgánicos en un material estable. Variables como pH, CO₂, temperatura y

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

humedad determinan la eficiencia del proceso, la actividad microbiana y la calidad del compost final.

El pH regula la actividad microbiana. La mayoría de las bacterias encargadas de descomponer la materia orgánica funcionan mejor en un rango cercano a neutro. Cuando el pH se desvía, la actividad biológica disminuye y el proceso se vuelve más lento o genera malos olores.

Un pH bajo suele aparecer en etapas iniciales por acumulación de ácidos orgánicos.

Un pH alto suele ocurrir por la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco.

Un pH inadecuado afecta la disponibilidad de nutrientes y puede inhibir microorganismos clave (Sundberg et al., 2004).

El CO₂ es un indicador directo de la respiración microbiana. Cuanto mayor sea la producción de CO₂, mayor es la actividad biológica.

Niveles bajos indican poca actividad por falta de humedad, nutrientes o aire.

Niveles muy altos pueden indicar condiciones anaeróbicas si hay mala aireación.

El monitoreo de CO₂ permite evaluar la eficiencia del compostaje

La temperatura es la variable más importante para evaluar el estado del compost.

El compostaje pasa por diferentes fases con un rango específico de temperatura, fase mesófila con entre 20–40°C, fase termófila con entre 45–65°C y el enfriamiento menor a 40°C

Las temperaturas altas pueden eliminar patógenos, pero la temperatura en extremo alta mata microorganismos beneficiosos para el compost. Siendo una variable que refleja directamente la actividad microbiana y la estabilidad del proceso (Bernal et al., 2009).

Por último, la humedad. El agua es esencial para la actividad microbiana, pero debe mantenerse en equilibrio. Ya que una baja humedad puede frenar a los microorganismos y una humedad alta desplaza el oxígeno y genera anaerobiosis por lo que el rango óptimo permite difusión de oxígeno y transporte de nutrientes (Haug, 1993).

TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Objetivo específico 1

Para el desarrollo del primer objetivo se realizará un análisis de la información principalmente mediante una metodología PRISMA, analizando la mayor cantidad de documentos con el fin de hallar aquellos útiles para nuestra investigación buscando principalmente cálculo de promedios, valores máximos y mínimos, y desviación estándar, de los rangos óptimos del compostaje con el fin de parametrizar el comportamiento general del sistema. Las variables se analizan en función del tiempo para evaluar la evolución térmica del proceso e identificar sus fases, considerando la dinámica microbiológica descrita en modelos de compostaje (Wang et al., 2023).

Objetivo específico 2

Se emplean técnicas de análisis descriptivo y comparativo orientadas a evaluar el desempeño del sistema de monitoreo implementado. Los datos obtenidos mediante los sensores de temperatura y humedad son registrados de manera continua y posteriormente organizados en tablas y gráficos temporales, permitiendo identificar el comportamiento de las variables durante las distintas fases del compostaje, basada en plataformas como thingspeak, flux y Arduino para asegurar el correcto funcionamiento y compatibilidad entre los componentes además de una calibración de variables y visualización de las mismas.

Objetivo específico 3

Para el tercer objetivo se realiza un análisis comparativo entre los datos obtenidos en diferentes puntos del sistema para evaluar la uniformidad de temperatura y humedad, identificando posibles desviaciones internas o zonas críticas. Asimismo, se analiza la relación entre variables mediante la observación de tendencias simultáneas, permitiendo identificar dependencias entre temperatura y humedad.

El comportamiento del sistema se evalúa en términos de estabilidad, analizando la variabilidad de las mediciones y la presencia de fluctuaciones, lo que permite detectar desviaciones operativas como cambios abruptos de temperatura o niveles inadecuados de humedad.

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

En conjunto, la metodología integra medición instrumental, observación del proceso y análisis de datos, permitiendo comprender el compostaje como un sistema dinámico medible, en el cual las variables pueden ser evaluadas en el tiempo y el espacio. Este enfoque garantiza coherencia entre el desarrollo teórico y la validación del prototipo, así como la posibilidad de replicar el sistema en estudios futuros.

FASES DEL PROCESO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

Fase marco teórico

Se fundamenta conceptualmente el estudio abordando el compostaje como un proceso biológico aerobio que depende de variables críticas como la temperatura y la humedad reflejando la actividad microbiana y permitiendo identificar las etapas del proceso.

Además, se incorporan los principios de monitoreo e instrumentación como elementos clave para el control del proceso, destacando el uso de sensores y sistemas de medición distribuida que permiten capturar la variabilidad interna del material en tiempo real siendo la base para el diseño del modelo.

Fase Arquitectura

Se establecen los rangos de operación óptimos, donde la temperatura oscilara entre 40 °C y 65 °C en la fase termófila, y la humedad se mantiene entre 50 % y 60 % para garantizar condiciones adecuadas de degradación (Bernal et al., 2009).

La distribución de sensores se plantea bajo un esquema de medición distribuida con ubicaciones estratégicas de múltiples puntos de medición dentro del material en proceso, con el fin de capturar el balance y proceso correcto del sistema (Zhang et al., 2020) permitiendo mejorar la toma de los datos y reducir margen de error en mediciones puntuales.

El sistema se estructura en tres sistemas: adquisición de datos (sensores de temperatura y humedad), comunicación (microcontroladores y protocolos de transmisión de datos) y procesamiento y visualización (Lee et al., 2015).

Fase diseño prototipo

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

La integración del sistema de monitoreo con el prototipo permite validar la arquitectura en condiciones reales de operación. En esta etapa también se verifica la calibración de los sensores, la integridad de la transmisión de datos, costos del sistema y la robustez frente a variaciones ambientales.

Fase prueba piloto

Se analiza la dinámica del compostaje desde un enfoque espacial y temporal, identificando patrones de comportamiento térmico y de humedad dentro del sistema (Awasthi et al., 2020).

El análisis de los datos facilita la evaluación del desempeño del proceso, la detección de posibles anomalías y la optimización de las condiciones operativas. Además, permite aplicar técnicas de análisis estadístico para mejorar la gestión del compostaje.

Transformando el sistema en una estructura adaptativa donde el monitoreo deja de ser únicamente descriptivo para volverse también predictivo y orientado a la toma de decisiones (Lee et al., 2015).

El desarrollo metodológico se estructura en tres partes. En la primera parte se define la arquitectura del sistema de monitoreo, estableciendo las variables a medir (temperatura y humedad), los rangos de operación y la distribución de sensores dentro del material en proceso, siguiendo criterios de medición distribuida. En la segunda parte se implementa el sistema dentro de un prototipo de compostaje, asegurando condiciones operativas como aireación, disposición del material y estabilidad del sistema, en concordancia con parámetros técnicos reportados para sistemas de biodegradación controlada (Domanovac et al., 2024). En la tercera parte se realiza el seguimiento continuo del proceso, registrando datos en distintos puntos del sistema, lo que permite analizar la variabilidad espacial y temporal del compostaje.

RESULTADOS

Objetivo 1

Para el primer objetivo se desarrollaron las fases metodológicas 1 y 2 planteadas anteriormente

Fase 1 Selección de las variables fundamentales sobre el compostaje

Para esta fase se encontró gracias a la metodología prisma cuales eran las variables más importantes para el proceso de compostaje, así como los rangos en los que cada variable debería de mantenerse para que el compostaje mantenga su calidad, así como que acciones se deben tomar en diferentes situaciones problemáticas, como se puede observar en la Tabla 3

Inicialmente se encontraron 156 artículos y, tras aplicar criterios de selección, se eligieron 8 estudios relevantes. Los resultados muestran un aumento en el uso de sensores digitales, monitoreo en tiempo real e inteligencia artificial para optimizar variables como temperatura, humedad y aireación en el compostaje. Sin embargo, aún existen limitaciones como altos costos, poca aplicación en Latinoamérica y falta de sistemas distribuidos de bajo costo. El proyecto busca contribuir a estas problemáticas mediante el desarrollo de un sistema de monitoreo aplicado a residuos agrícolas colombianos.

Tabla 3

Rangos recomendados y acciones correctivas para el monitoreo del compostaje por variable

PH del suelo		
Descripción	valor	Acción por tomar
Valor recomendable	6.5 -8.0	Mantener condiciones actuales
Valor critico menor al recomendable	6.0	Añadir materiales naturales secos, airear y reducir residuos húmedos
Valor critico mayor al recomendable	8.5	Añadir materiales naturales ricos en carbono, evitar exceso de nitrógeno
Co2		

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Descripción	valor	Acción por tomar
Valor recomendable	300-600	Mantener condiciones actuales
Valor critico menor al recomendable	<300	Añadir materia orgánica fresca o humedad
Valor critico mayor al recomendable	>600	Mejorar la aireación y Revolver el compostaje
Temperatura		
Descripción	valor	Acción por tomar
Valor recomendable	45°C-65°C	Mantener condiciones actuales
Valor critico menor al recomendable	40°C	Añadir material fresco o nitrógeno, mejorar humedad
Valor critico mayor al recomendable	70°C	Revolver el compostaje, reducir tamaño o agregar material seco
Humedad		
Descripción	valor	Acción por tomar
Valor recomendable	50%-60%	Mantener condiciones actuales
Valor critico menor al recomendable	40%	Añadir agua uniformemente
Valor critico mayor al recomendable	65%	Añadir material seco y airear

Nota. Esta tabla explica los rangos que debería mantener cada variable para una mejor calidad de compostaje y que medidas correctivas aplican en caso de salirse de ese rango.

Fase 2. Replica de compostaje agrícola

Para esta fase se implementaron los métodos tradicionales de medición de variables de temperatura y humedad en un compostaje compuesto principalmente por restos de frutas y verduras como sandía, melón, zanahoria y papa siguiendo guías técnicas como las de Agrosavia (Díaz et al., 2024),

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

para la toma de temperatura se usó un termómetro de compostaje o también llamado termómetro de vástago largo mientras que para la toma de humedad se usó la prueba del puño, prueba que consiste en comprimir con el puño un poco del abono comprobando la textura que tenga, concluyendo en una temperatura de 20°C

Figura 1

Primera prueba del sistema de monitoreo del compostaje



Nota. La figura muestra la primera prueba que se realizó al compostaje.

Fase 3. Diseño del sistema de monitoreo

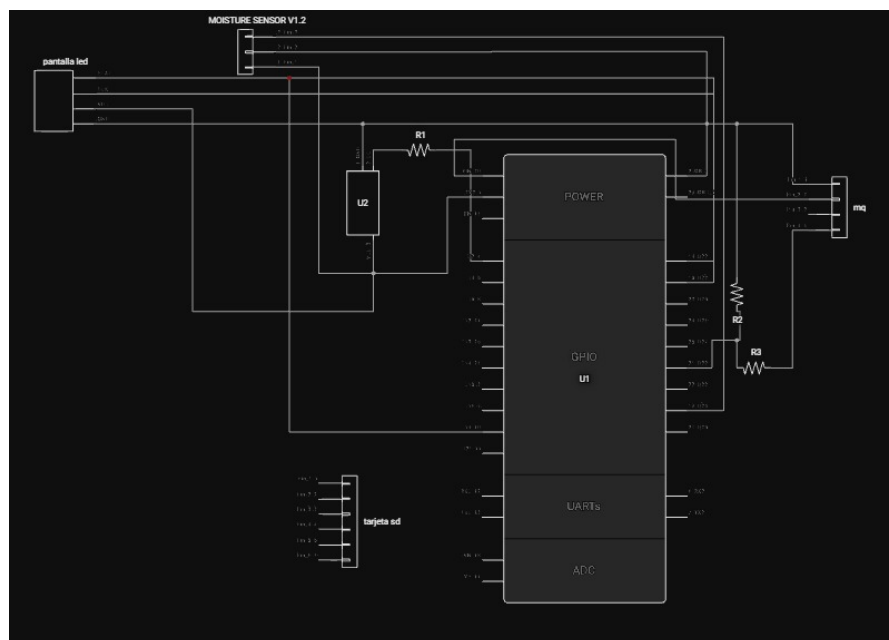
Durante esta fase se implementaron las respectivas capas de desarrollo explicadas anteriormente para crear el sistema de monitoreo

Capa 1 Sistema eléctrico

Para esta capa se diseñó un diagrama esquemático del sistema electrónico. La Figura 2 muestra las conexiones desde el microcontrolador principal hacia la pantalla OLED, una etapa de alimentación de energía, resistencias y los sensores que medirán las variables constantemente. El esquema representa cómo circulan los datos y la energía entre los componentes mediante cables y pines específicos. De forma general, este diagrama ayudo a planificar y entender el funcionamiento del circuito electrónico antes de construirlo físicamente.

Figura 2

Diagrama esquemático del sistema electrónico de monitoreo para compostaje



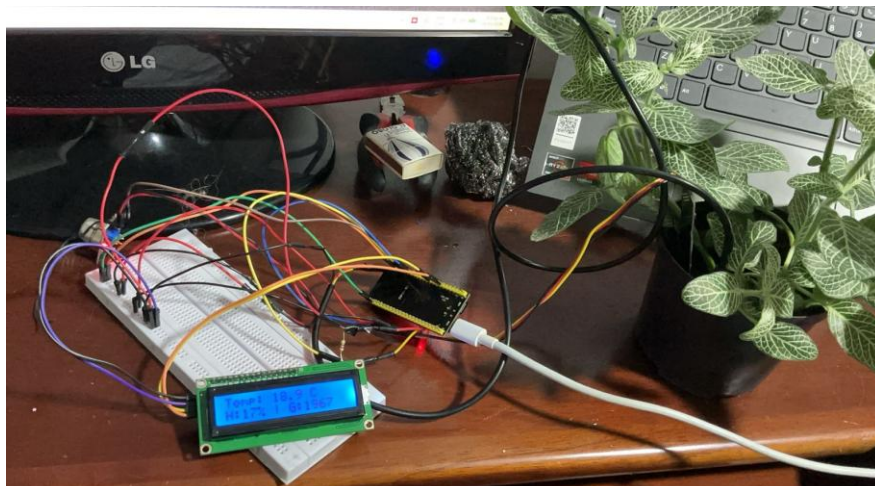
Nota. Esta figura muestra el esquema eléctrico que se utilizó para el montaje del prototipo.

El prototipo desarrollado integra un sistema de monitoreo distribuido basado en un microcontrolador ESP32-S3 DevKitC-1 N16R8 240MHz WiFi 2.4GHz BT, encargado de la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo real. Se incorporaron sensores de temperatura y humedad para evaluar las condiciones internas del material en descomposición, junto con un sensor de CO₂ MQ-135, que permite estimar la actividad microbiana mediante la medición de gases generados durante el proceso.

La visualización de datos se realizó mediante una pantalla LCD 16x2 I2C, facilitando el seguimiento directo de las variables. Los sensores fueron distribuidos estratégicamente dentro del material para capturar la variabilidad espacial del compostaje. Este sistema permite obtener mediciones continuas, confiables y de bajo costo, validando la viabilidad técnica del monitoreo en pequeña escala agrícola.

Figura 3

Diseño del prototipo



Nota. La figura muestra una versión primitiva del prototipo.

Capa 3 Programación basada en el lenguaje Arduino

El funcionamiento del prototipo fue desarrollado mediante programación en el entorno Arduino IDE, empleando una estructura orientada a la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. El código implementado permite la lectura constante de las variables medidas por los sensores, en la adaptación de las señales obtenidas y la gestión de la información generada por el sistema.

También se incorporaron rutinas para visualizar de forma local los datos en una pantalla LCD y para la transmisión inalámbrica de la información hacia una plataforma de monitoreo remoto. La programación también usa mecanismos de actualización continua de las mediciones cada 10 minutos, facilitando la supervisión de las condiciones presentes durante el proceso de compostaje.

A continuación se muestran secciones principales del código

```
#include <WiFi.h>
#include <ThingSpeak.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Nota. La figura muestra las librerías usadas para el código

```
// --- CONFIGURACIÓN PANTALLA ---
int lcdColumns = 16;
int lcdRows = 2;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, lcdColumns, lcdRows);

// --- CONFIGURACIÓN TEMPERATURA (DS18B20) ---
const int pinDatos = 4;
OneWire ourWire(pinDatos);
DallasTemperature sensors(&ourWire);

// --- CONFIGURACIÓN HUMEDAD DE SUELO ---
const int pinHumedad = 6;

// --- CONFIGURACIÓN CALIDAD DE AIRE (MQ-135) ---
const int pinMQ135 = 21;

// --- CONSTANTES DE CALIBRACIÓN MQ-135 ---
const float RO_AIRE_LIMPIO = 3.60;
const float RL_PLACA = 1.0;
```

Nota. La figura muestra la configuración de cada uno de los sensores y respectivos pines

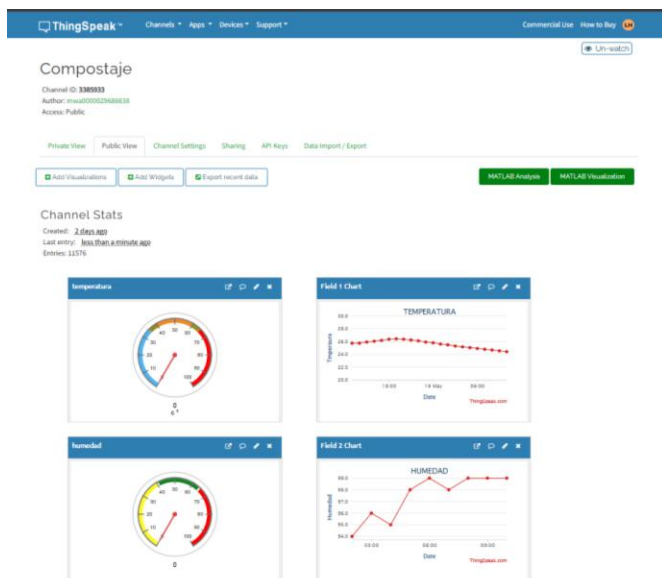
Capa 4 Procesamiento y almacenamiento de datos

Para esta capa en la plataforma de Thingspeak se implementaron gráficas y barómetros que reciben y procesan la información recolectada por el microprocesador de los sensores en tiempo real, mostrando una línea de tiempo con los datos recolectados, permitiendo identificar momentos en los que algo pudo interferir con el compostaje como se muestra en la Figura 3.

Figura 4

Interfaz de usuario desde Thingspeak

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos



Nota. La figura muestra la interfaz de usuario desde la plataforma de Thingspeak con los datos en tiempo real.

Objetivo 2

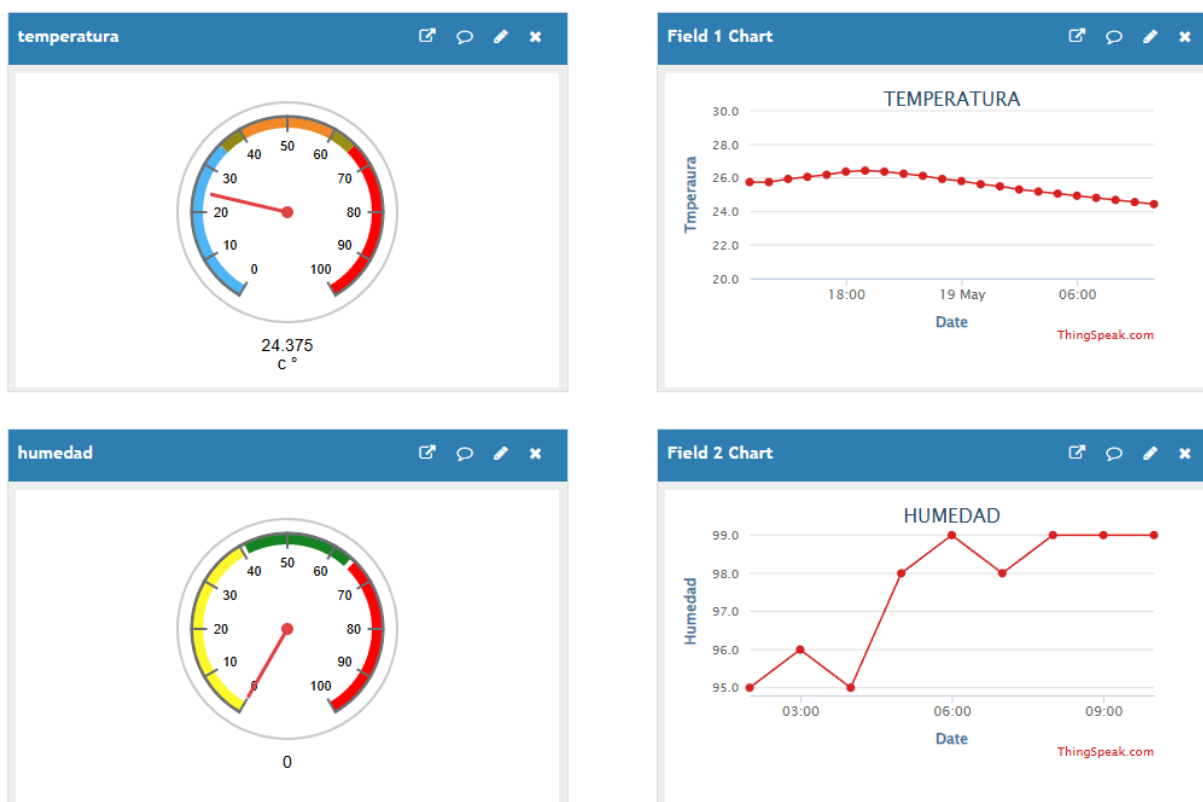
Fase 4. Seguimiento y análisis del proceso de compostaje

Para el seguimiento y el análisis se examinó por alrededor de 14 días, durante el proceso se observó que el compostaje registrando las variables de humedad, temperatura y concentración de gases mediante el sistema implementado. Los datos fueron transmitidos y almacenados en la plataforma Thingspeak, permitiendo visualizar el comportamiento de las variables en tiempo real y evaluar las condiciones del material en descomposición. Los resultados obtenidos mostraron valores de humedad cercanos al 80 % durante gran parte del período de observación, indicando una elevada disponibilidad de agua dentro de la mezcla. Por su parte, la temperatura presentó valores alrededor de los 20 °C. En cuanto a la concentración de gases detectados se observaron pocas variaciones durante el período de monitoreo, lo que puede significar una actividad y condiciones relativamente estables dentro del sistema. Durante el período de seguimiento se evidenció una reducción gradual del volumen del material orgánico y cambios en su apariencia y textura. La presencia de humedad constante en el interior de la mezcla, condición favorable para la actividad microbiana responsable de la degradación de la materia orgánica. No se identificaron olores fuertes o condiciones que indicaran fallas en el proceso de compostaje verificando los datos obtenidos con el sistema de monitoreo distribuido aplicado.

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Figura 5

Datos observados



Captura tomada 19/05/2026 10:45 AM

Nota. La figura muestra una tabla con todos los datos obtenidos durante su seguimiento.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

PROPUESTA DE SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

Consiste en el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo distribuido de bajo costo para el control de variables críticas en el proceso de compostaje, específicamente temperatura, humedad, pH y CO₂. Este sistema permite pasar de un manejo experimental del compostaje a un enfoque basado en datos medibles en tiempo real.

El modelo se fundamenta en la integración de sensores accesibles conectados a un microcontrolador, que recopila y muestra información continua sobre el estado del material en descomposición. A diferencia de los sistemas industriales, esta propuesta está diseñada para ser económicamente viable y fácil de implementar en pequeños y medianos sistemas agrícolas, sin requerir infraestructura compleja ni conocimientos técnicos avanzados.

La medición distribuida dentro del material permite identificar variaciones internas del proceso, como zonas con baja temperatura o exceso de humedad, facilitando la toma de decisiones, como el batir el material o el ajuste de condiciones. De esta manera, se mejora el proceso del compost, se optimiza el tiempo de descomposición y se reduce la probabilidad de fallas asociadas a condiciones anaeróbicas.

Además, el sistema incorpora un enfoque práctico de visualización de datos, permitiendo al usuario interpretar la información sin necesidad de herramientas avanzadas. Esto favorece su uso en campo y aumenta la probabilidad de adopción por parte de los productores.

En conjunto, la propuesta responde a la falta de monitoreo técnico en el compostaje, además ofrece una alternativa accesible, funcional y adaptable a las condiciones reales del sector agrícola, contribuyendo a mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto permiten observar que la implementación de este tipo de sistemas de monitoreo basado en sensores de bajo costo es una alternativa a considerar siendo viable para mejorar el seguimiento de variables críticas en el proceso de compostaje agrícola. Con la implementación del prototipo fue posible registrar de manera continua la temperatura, humedad y gases, permitiendo tener una visión más específica del comportamiento del interno del compostaje y sus componentes. Considerando que gran parte de los sistemas de compostaje utilizados por pequeños y medianos productores siguen dependiendo de métodos poco fiables que limitan la capacidad de detectar desviaciones que afectan la calidad del compostaje, estos resultados adquieren una mayor relevancia.

Además, los resultados obtenidos durante la revisión prisma posibilitó identificar de manera confiable una tendencia hacia la incorporación de tecnologías de monitoreo en procesos de compostaje. Sin embargo, también se orienta más a sistemas industriales como reactores cerrados o plataformas tecnológicas de altos costos. Por lo que nuestro proyecto destacaba la importancia de este monitoreo para los sistemas de compostaje de pequeños y medianos agricultores y demostrando que es posible obtener datos útiles para la toma de decisiones sin necesidad de contar con infraestructuras complejas y altos costos de mantenimiento y operación siendo más accesible y viable.

Uno de los aspectos más importantes observados durante la prueba piloto fue la capacidad del sistema para detectar variaciones internas en diferentes puntos del compostaje, respaldando la existencia de cambios térmicos dentro de las pilas de compostaje y que una medición puntual no representa adecuadamente el estado global del compostaje comprobando que la implementación de sensores distribuidos son una gran ventaja frente a métodos tradicionales por lo que permite identificar zonas de comportamiento extraño que podrían pasar desapercibidas por las mediciones manuales convencionales.

También dentro de los resultados obtenidos se ve que la temperatura continúa siendo uno de los indicadores más representativos del estado biológico del compostaje y durante el seguimiento se observó que las variaciones térmicas registradas permitieron relacionar el comportamiento del sistema con las fases descritas en la literatura. En consecuencia, el monitoreo continuo de esta

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

variable facilita la identificación de condiciones favorables para la degradación de la materia orgánica y permite detectar situaciones que pueden volver ineficaz el compostaje.

Finalmente, los resultados permiten concluir que el monitoreo continuo transforma el compostaje de un proceso basado en experiencia y métodos poco fiables en un sistema sustentado en información objetiva y verificable demostrando que la medición distribuida mejora la comprensión de la dinámica interna del compost, facilita la detección temprana de condiciones desfavorables y proporciona una base técnica para la toma de decisiones durante la operación del sistema. Siendo un avance hacia la accesibilidad del compostaje agrícola optimizando el aprovechamiento de residuos orgánicos y fortalecimiento de las prácticas de producción sostenible en el sector agrícola.

PLAN DE DIVULGACIÓN

El plan de divulgación y transferencia tecnológica de este proyecto de grado está diseñado para conectar los resultados de la investigación técnica con el sector productivo rural, estructurándose en un componente académico y otro de apropiación social. En el ámbito científico, se contempla de manera exclusiva el sometimiento de un artículo original o nota técnica a la *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria* de AGROSAVIA. Al estar indexada en Scopus y Publiindex en él tiene una calificación B, esta publicación validará el rigor metodológico y de ingeniería del sistema mediante una evaluación por pares ciegos. El manuscrito se centrará en describir el diseño del sistema de monitoreo, detallando la adquisición de datos de temperatura, humedad y gases en la nube a través de la plataforma ThingSpeak. Asimismo, se analizarán los resultados del piloto para demostrar cómo el seguimiento en tiempo real ayuda a prevenir condiciones inadecuadas en el compostaje, aprovechando el modelo de Acceso Abierto Diamante de la entidad, el cual elimina los costos de publicación y garantiza el acceso libre al conocimiento.

Por otra parte, la transferencia en campo se articulará mediante demostraciones prácticas en colaboración con el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y asociaciones locales de agricultores. En estos espacios cortos, se exhibirá el prototipo en funcionamiento real para que los productores observen de primera mano cómo cambian las variables críticas y qué decisiones operativas inmediatas, como el volteo o la hidratación de la pila, se pueden tomar con dicha información. Esta estrategia busca que tanto productores como posibles compradores comprendan el valor del sistema de monitoreo de forma visual y directa, facilitando la adopción de la tecnología sin necesidad de interactuar con tecnicismos o conocimientos electrónicos avanzados.

Para complementar la extensión en campo, se implementará una estrategia de divulgación digital basada en herramientas sencillas y de alta adopción como WhatsApp. En lugar de manuales extensos, se generarán contenidos cortos y concretos, incluyendo videos breves, imágenes y explicaciones sencillas que los usuarios puedan consultar en cualquier momento desde sus teléfonos móviles. Estos recursos multimedia abordarán pautas prácticas esenciales como la instalación física de los sensores en el terreno, la lectura correcta de los datos en la interfaz y las rutinas de mantenimiento básico necesarias para proteger los componentes contra el desgaste por la humedad, asegurando un canal de consulta permanente y accesible.

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Finalmente, el proyecto se validará directamente mediante la implementación del sistema en fincas seleccionadas de la región, las cuales funcionarán como puntos de referencia o fincas vitrina. Estos entornos reales permitirán a otros agricultores de la comunidad comparar de forma directa el compostaje tradicional con el monitoreado, evidenciando las mejoras en el tiempo de maduración, la calidad del producto final y abriendo el espacio para recibir sugerencias de mejora frente a situaciones no contempladas en el laboratorio. Durante las etapas iniciales de uso, se ofrecerá un acompañamiento básico para resolver dudas operativas sencillas y evitar el abandono prematuro de la tecnología. A partir de este soporte, se incentivará la difusión orgánica de par a par, logrando que los propios productores capacitados compartan su experiencia con sus vecinos, asegurando la sostenibilidad y la apropiación del sistema a largo plazo.

CONCLUSIÓN

El desarrollo del sistema de monitoreo para la optimización del compostaje de residuos mediante hardware de bajo costo cumplió satisfactoriamente con el objetivo general planteado. A través de la integración de sensores de temperatura, gases y humedad a un microcontrolador ESP32 y una plataforma de visualización remota, fue posible construir un prototipo funcional capaz de registrar información relevante del compostaje en tiempo real. Siendo una alternativa viable para mejorar el seguimiento del compostaje en sistemas de pequeños y medianos agricultores.

Respecto al primer objetivo específico la revisión mediante el estado del arte PRISMA nos permitió evidenciar como las variables tomadas como humedad, gases y temperatura se relacionaban directamente con la efectividad del compostaje, específicamente durante la etapa termófila y mesófila, en las cuales el compostaje adquiere los nutrientes necesarios. Siendo las más utilizadas para evaluar la evolución del compostaje. Por otro lado, el diseño del prototipo logro integrar sensores de bajo costo manteniendo un criterio de calidad, demostrando que si es posible desarrollar este tipo de sistemas de monitoreo de forma accesible y sin requerir una infraestructura compleja.

En cuanto al seguimiento y análisis relacionados al segundo objetivo del proyecto, los resultados de la evaluación de las pruebas de desempeño demostraron que la medición distribuida facilito identificar las variaciones internas de temperatura y humedad del compostaje, corrigiendo posibles errores en métodos tradicionales donde las variables eran fácilmente manipulables por el entorno y no por el compostaje en sí. Además, el monitoreo continuo ayudo a identificar desviaciones y relacionarlas a cambios observados durante la evolución física del compostaje de manera rápida y sencilla.

De manera general, los resultados permiten responder a la pregunta problema del proyecto de forma positiva ya que la implementación de un sistema de monitoreo distribuido mejora el control operativo aplicado sobre una o varias líneas de compostaje, al generar información fiable y continua del proceso Facilitando la toma de decisiones y reduciendo la dependencia de métodos tradicionales anticuados y lentos utilizados en este tipo de prácticas agrícolas.

BIBLIOGRAFIA

BBVA.com. (2025, 16 de mayo). *¿Qué es el compost y cuáles son sus fases, usos y beneficios?*

BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-compost-y-cuales-son-sus-fases-el-poder-del-suelo-vivo/>

CABI. (s. f.). *Salud del suelo: su importancia y cómo protegerla*. Portal de BioProtección de

CABI. <https://bioprotectionportal.com/es/resources/soil-health-importance-and-how-to-protect/>

Corbett, T.D.W., Westholm, M., Rosling, A. *et al.* Organic carbon source controlled microbial olivine dissolution in small-scale flow-through bioreactors, for CO₂ removal. *npj Mater Degrad* 8, 34 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00454-w>

Cremonez, P. A., Teleken, J. G., Meier, T. R. W., & Alves, H. J. (2021). *Two-stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review*. *Journal of Environmental Management*, 281, 111854. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111854>

Domanovac, T. (2024). *Design of a Bioreactor for Aerobic Biodegradation of Biowaste: Insights into Parameterization and Mass Balance for Engineering Applications*. *Processes*, 12(3), 545. <https://doi.org/10.3390/pr12030545>

Greff, B., Szigeti, J., Nagy, Á., Lakatos, E., & Varga, L. (2022). *Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: A review*. *Journal of Environmental Management*, 302(Part B), 114088. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114088>

Hussain, A., Rehman, F., Rafeeq, H., Waqas, M., Asghar, A., Afsheen, N., Rahdar, A., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2022). *In-situ, ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air – A review*. *Chemosphere*, 289, 133252. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133252>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2015). *Cartilla práctica para la elaboración de abono orgánico compostado en producción ecológica*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Rural. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/agricultura-ecologica-1/documentos/cartilla-elaboracion-abono-organico-solido-28-11-2.aspx>

Jiménez, P. (s. f.). *Microorganismos del suelo: La biodiversidad que sostiene la vida*. Agricultura Regenerativa. <https://www.agriculturaregenerativa.es/microorganismos-del-suelo-la-biodiversidad-que-sostiene-la-vida/>

Kumar, D. J. P., Mishra, R. K., Chinnam, S., Binnal, P., & Dwivedi, N. (2024). *A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends*. Biotechnology Notes, 5, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.02.001>

Lazrak, M., Hernández, A., & García, J. (2025). *AI-driven and sensor-based composting in a connected bioreactor: A novel framework for predicting maturity and quality dynamics*. Waste Management Bulletin, 3(4), 100254. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100254>

Martins, W. A., Simão Neto, F., Sousa, P. da S., Cavalcante, I. O., Lopes da Silva, J., Fernandes Melo, R. L., Chaves de Lima, R. K., da Silva Vieira, R., da Silva Aires, F. I., & Sousa dos Santos, J. C. (2024). *Biohydrogen production in bioreactors: Global trends, key factors, and emerging directions*. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.168>

Muñoz-Morales, J. M., Capilla-Otero, M. M., Gordillo-Ibarra, X., & Muñoz-Morales, J. M. (2024). *El impacto del uso inadecuado de agroquímicos y riego intensivo en la degradación del suelo: del cultivo al yermo* (Revista Alianzas y Tendencias BUAP, 9(34), 65-70). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <http://doi.org/10.5281/zenodo.12510276>

Noticias ONU. (4 de diciembre de 2020). *La biodiversidad del suelo, una aliada invisible frente al cambio climático*. Naciones Unidas. <https://news.un.org/es/story/2020/12/1485132>

Obono Mba, F., Kokea Tiela, N. E., & Foyet Gankam, A. D. (2024). *Optimization of the Johnson-su bioreactor method for the production of organic fertilizer by composting cassava waste at Ngotto, East Cameroon Region: Contextualizing a nature-based technological approach*. African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences, 7(6), 1779–1793. <https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v7i6.51941>

Diseño de un Sistema de Monitoreo para la Optimización del Compostaje de Residuos

Singh, A., Sawant, M., Herlekar, M., Aymerich, E., & Starkl, M. (2024). *Assessing feasibility of sewage sludge composting in rotary drum reactor*. *Bioresource Technology*, 394, 130219. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130219>

Van, D. P., Fujiwara, T., Tho, B. L., Toan, P. P. S., & Minh, G. H. (2020). *A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends*. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 1–17. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>

Veizaga Balta, W., Vega Torrejón, G., & Colque Ayaviri, J. C. (2025). *Monitoreo y control de compostaje automatizado basadas en microcontroladores Raspberry Pi, sensores de gases, temperatura, pH, humedad y placas de desarrollo*. *Journal Boliviano de Ciencias*, 21(57), 75–93. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1326>

Wang, J., Li, C., Zhu, Z., Zhu, X., Li, H., Nyambura, S. M., Feng, X., & Zhou, H. (2024). *Bionic stirring device for horizontal composter to improve aeration efficiency: Design and optimisation using discrete and finite element methods*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225, 109257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109257>

Wang, Z., & Hu, Y. (2023). *A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: characteristics, operational conditions, and improvement strategies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113208>

Díaz, S. P., Estrada, M. S. S., Rusinque, M. C., Tapias, D. F. R., & Bonilla, G. A. E. (2024). *Guía de compostaje para agricultores*. En *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria eBooks*. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7407808>

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2022). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO). ISBN 978-92-5-307844-8