

Aplicación móvil agrícola con redes neuronales convolucionales para control de producción de hongos comestibles

Agricultural mobile application based on convolutional neural networks for the control of edible mushroom production

Kevin Arnoldo Ari Quispe

kevinari123@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5307-3707>

**Universidad Privada Domingo Savio.
Potosi, Bolivia**

Recibido el 12 de febrero de 2025/Arbitrado el 05 de marzo de 2025/Aceptado el 14 de mayo de 2025/Publicado el 04 de julio de 2025

RESUMEN

La producción de hongos comestibles es un sector agrícola en crecimiento que requiere control preciso de variables ambientales. Este estudio tuvo por objetivo desarrollar una aplicación móvil agrícola integrada con redes neuronales convolucionales para mejorar el control de información en la producción de hongos comestibles en NEOS, Bolivia. Se aplicó un enfoque mixto con metodología Scrum para el desarrollo del sistema BPM, implementando sensores IoT y algoritmos CNN. La muestra incluyó 50 productores (10 de NEOS y 40 de Chuquisaca). Los resultados mostraron una mejora del 25% en la detección temprana de contaminaciones y un incremento del 18% en la eficiencia de los procesos de colonización y fructificación. La aplicación permitió monitoreo remoto en tiempo real y generación automática de reportes, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia productiva. Se concluye que la integración de tecnologías emergentes mejora sustancialmente la gestión en la producción de hongos comestibles.

Palabras Claves: Agricultura de precisión; Aplicaciones móviles agrícolas; Hongos comestibles; Internet de las cosas; Redes neuronales convolucionales.

ABSTRACT

Edible mushroom production is an expanding agricultural sector that demands precise control of environmental variables. This study aimed to develop an agricultural mobile application integrated with convolutional neural networks (CNNs) to enhance information management and production control of edible mushrooms in NEOS, Bolivia. A mixed-methods approach was applied, employing the Scrum framework for the development of a Business Process Management (BPM) system and implementing Internet of Things (IoT) sensors in conjunction with CNN algorithms. The study sample consisted of 50 producers (10 from NEOS and 40 from Chuquisaca). The results demonstrated a 25% improvement in early contamination detection and an 18% increase in the efficiency of colonization and fruiting processes. The application enabled real-time remote monitoring and automatic report generation, contributing to greater sustainability and production efficiency. These findings indicate that integrating emerging technologies can significantly enhance management and decision-making in edible mushroom production systems.

Keywords: Precision agriculture; Agricultural mobile applications; Edible mushrooms; Internet of Things; Convolutional neural networks.

INTRODUCCIÓN

La revolución tecnológica ha transformado profundamente las prácticas agrícolas tradicionales, dando lugar a conceptos innovadores como la agricultura de precisión, la agricultura inteligente y la agricultura 4.0. Esta transformación digital se manifiesta en la integración de tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial, aprendizaje automático, robótica agrícola, sensores inteligentes, drones, sistemas de gestión de procesos de negocio (BPM) y análisis de datos en tiempo real orientadas a optimizar la productividad, la sostenibilidad y la rentabilidad agrícola (Padhiary et al., 2025).

En respuesta a los desafíos globales actuales, tales como el crecimiento poblacional, el cambio climático y la limitación de recursos naturales, la agricultura de precisión emerge como una estrategia clave. Esta permite a los productores tomar decisiones informadas mediante datos precisos y análisis predictivos, optimizando el uso eficiente de agua, fertilizantes, pesticidas y energía, mientras minimiza el impacto ambiental (Getahun et al., 2024). Dentro de este contexto, la fungicultura, y específicamente la producción de hongos comestibles, se posiciona como uno de los sectores agrícolas de mayor crecimiento a nivel mundial.

Por lo que, su auge en las últimas dos décadas responde a su valor nutricional, propiedades medicinales, sostenibilidad ambiental y potencial económico (Amin y Park, 2025). Los hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*) son especialmente destacados por su versatilidad nutricional, facilidad de cultivo, adaptabilidad a diferentes sustratos, ciclo corto de producción y alto valor económico en mercados nacionales e internacionales. Sin embargo, el éxito en la producción de hongos requiere un control riguroso de variables ambientales críticas, tales como temperatura (18-25°C), humedad relativa (80-95%), concentración de CO₂ (1000-2000 ppm), niveles adecuados de oxígeno y luz (menos de 200 lux), así como la prevención de contaminantes microbiológicos como *Trichoderma*, *Aspergillus* y *Penicillium*, que pueden perjudicar la producción (Kewessa et al., 2022).

Así, la sensibilidad ambiental de los hongos implica monitoreo constante y respuestas rápidas ante desviaciones, ya que dependen de la descomposición de materia orgánica y son muy susceptibles a la competencia y proliferación de microorganismos contaminantes. Frente a estos retos, las tecnologías de agricultura de precisión han demostrado un potencial transformador mediante sistemas automatizados de monitoreo y control inteligente, facilitando la gestión predictiva de recursos y toma de decisiones basadas en datos en tiempo real (Getahun et al., 2024).

Un avance significativo lo representan las redes neuronales convolucionales (CNN), que superan en precisión, velocidad y consistencia a la detección manual para identificar enfermedades, plagas y contaminantes en cultivos mediante análisis visual computacional (Yang et al., 2025). Su arquitectura, optimizada para procesar datos visuales complejos, se ha entrenado para reconocer características anómalas en hongos, facilitando la detección temprana de problemas fitosanitarios (Gupta y Singh, 2022). La integración del IoT potencia estas capacidades, brindando monitoreo en tiempo real de variables ambientales mediante sensores de alta precisión, lo que garantiza la estabilidad crítica para la fungicultura (Rejeb et al., 2020; Sofiev et al., 2023).

Por tanto, estos sistemas se organizan en capas de percepción, red y aplicación, permitiendo la generación de alertas, recomendaciones y análisis predictivos que fortalecen la toma de decisiones

automatizada. La convergencia de IoT y CNN presenta un horizonte prometedor para la producción

de hongos comestibles, al combinar monitoreo ambiental continuo y análisis visual inteligente para optimizar el control de cultivo y prevenir contaminaciones, aumentando así la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad del sector. Finalmente, los sistemas de gestión de procesos de negocio (BPM) complementan esta arquitectura tecnológica, coordinando las múltiples fases críticas de la producción de hongos, desde la selección de sustratos hasta el procesamiento postcosecha, lo que mejora la eficiencia productiva y la trazabilidad (Miller et al., 2025).

De ahí que, las aplicaciones móviles agrícolas constituyen otra herramienta fundamental, revolucionando el acceso y gestión de la información productiva mediante interfaces accesibles, monitoreo remoto y toma de decisiones en tiempo real, contribuyendo a la modernización y competitividad del sector (Mowla et al., 2023). En Bolivia, la empresa NEOS, dedicada a la producción comercial de *Pleurotus ostreatus* en Sucre, enfrenta desafíos para monitorear variables ambientales críticas y detectar contaminaciones oportunamente, debido a la ausencia de sistemas tecnológicos avanzados que integren IoT, CNN y BPM para un control integral de sus procesos productivos. Por tanto, sería fundamental desarrollar una aplicación móvil agrícola integrada con redes neuronales convolucionales para mejorar el control de información en la producción de hongos comestibles.

METODOLOGÍA

Para esta investigación se adoptó un enfoque metodológico mixto con diseño de campo, combinando métodos cuantitativos, cualitativos y tecnológicos para abordar de forma integral la problemática del control de producción de hongos comestibles. Esta combinación permite obtener una comprensión profunda y multidimensional, integrando datos objetivos y experiencias prácticas con el desarrollo de tecnologías innovadoras aplicadas al monitoreo y gestión del proceso productivo.

Conceptuales: Control de producción: conjunto de procesos orientados a supervisar y optimizar las condiciones ambientales y la calidad del cultivo de hongos. Parámetros ambientales: variables físicas y químicas que afectan el desarrollo del hongo, como temperatura, humedad, concentración de CO₂, intensidad lumínica y pH del sustrato. Contaminación fúngica: presencia de microorganismos no deseados que afectan negativamente la calidad y producción del cultivo.

Operativas: Temperatura y humedad relativa se midieron mediante sensores DHT22 con precisiones de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2-5\%$, respectivamente. Concentración de CO₂ se registró con sensores MQ-135, con precisión del $\pm 10\%$. Intensidad lumínica se cuantificó mediante sensores LDR con precisión del $\pm 5\%$. pH del sustrato se evaluó con sensores especializados con resolución de ± 0.1 unidades. Contaminación fúngica se detectó a través de imágenes digitales procesadas por redes neuronales convolucionales, clasificando niveles y tipos de contaminación.

Este estudio corresponde a una investigación descriptiva y propositiva. La primera fase caracterizó las condiciones actuales del control informativo y productivo en la empresa NEOS, proporcionando una base cuantitativa y cualitativa para identificar las deficiencias. La segunda fase se centró en la propuesta, desarrollo e implementación de un sistema tecnológico innovador para optimizar estos procesos. La población estuvo constituida por 50 participantes: 10 trabajadores directos de la empresa (6 ingenieros agrónomos, 2 técnicos de calidad y 2 becarios en biotecnología)

y 40 productores independientes de Chuquisaca con experiencia en producción comercial de hongos. Se aplicó un muestreo censal por la especificidad y tamaño de la población.

Se aplicaron los siguientes métodos:

- Histórico-lógico para analizar la evolución de tecnologías agrícolas y de gestión.
- Deductivo-inductivo para derivar principios específicos y construir conclusiones generalizables.
- Análisis-síntesis para descomponer procesos complejos e integrar componentes tecnológicos.
- Modelación para representar de forma abstracta procesos fungícolas y sistemas de control.
- Revisión bibliográfica sistemática para fundamentar teóricamente el estudio y definir el estado del arte.
- Método sistémico para analizar la interacción entre tecnologías y procesos productivos.

Se implementaron:

- Observación estructurada con guías especializadas para registrar procesos productivos y condiciones ambientales en puntos clave.
- Entrevistas semiestructuradas aplicadas a técnicos, gerentes y operarios, explorando sus percepciones y necesidades.
- Encuestas estructuradas a la población completa para recopilar datos cuantitativos sobre conocimientos, actitudes y aceptación tecnológica, con análisis estadístico descriptivo y comparativo.

Desarrollo tecnológico

Se instalaron sensores IoT avanzados: DHT22 para temperatura y humedad, MQ-135 para CO₂, LDR para luz, y sensores de pH para sustratos. La calibración siguió protocolos estándar de precisión y frecuencia de muestreo adecuada para control continuo. Las redes neuronales convolucionales se diseñaron con capas convolucionales que usan filtros de 3x3 y 5x5 píxeles, seguidas de capas pooling máximo para reducir dimensiones, dropout para evitar sobreajuste y capas densas para clasificación. El dataset incluyó 2,500 imágenes etiquetadas de sustratos contaminados y sanos, dividido en conjuntos de entrenamiento y prueba. El modelo se entrenó con algoritmos optimizados, monitoreando su desempeño mediante métricas como precisión, recall y F1-score para garantizar alta confiabilidad en la detección de contaminación.

Se desarrolló una arquitectura software basada en el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) para separar responsabilidades, facilitar el mantenimiento y escalar el sistema. Se programaron microcontroladores ESP32 con Arduino IDE, la aplicación móvil se construyó con Flutter, y los modelos de machine learning se gestionaron con TensorFlow. La base de datos en tiempo real utilizó Firebase, y la comunicación inalámbrica se estableció mediante protocolos WiFi y Bluetooth para máxima conectividad.

La validación del sistema incluyó pruebas funcionales y de rendimiento en condiciones reales de cultivo. Se establecieron protocolos para verificar la precisión del monitoreo ambiental, la

efectividad de la detección de contaminantes y la usabilidad de la aplicación móvil. Se analizaron resultados y se realizaron ajustes iterativos para optimizar la respuesta del sistema a las condiciones

productivas.

Se respetaron normas éticas garantizando el consentimiento informado de todos los participantes. Los datos personales y productivos se manejaron con confidencialidad, empleando controles de acceso y asegurando la privacidad según estándares institucionales.

RESULTADOS

Los resultados de esta investigación aportan evidencia científica sólida que confirma la efectividad transformadora del sistema desarrollado para optimizar el control de información en la producción de hongos comestibles. La aplicación móvil, integrada con redes neuronales convolucionales, sensores IoT y sistemas BPM, evidenció mejoras notables en diversas dimensiones operativas y técnicas dentro del proceso fungícola. El análisis de los datos recogidos durante el estudio muestra un desempeño sobresaliente en precisión de detección, control ambiental automatizado, reducción de pérdidas por contaminación y optimización del tiempo de respuesta.

Los indicadores cuantitativos superaron los objetivos planeados, lo que valida la hipótesis sobre la eficacia de la integración tecnológica en procesos agrícolas especializados. La evaluación integral del sistema consideró cinco dimensiones: caracterización de los participantes, parámetros de monitoreo ambiental, rendimiento del modelo de inteligencia artificial, funcionalidad del sistema y su impacto en la producción comercial. A continuación, se presentan los resultados y su análisis correspondiente.

Caracterización de los participantes

La muestra incluyó 50 participantes, con un 20% de personal técnico de la empresa NEOS y un 80% de productores fungícolas independientes del departamento de Chuquisaca. Esta composición asegura diversidad en experiencia y perfil profesional, fortaleciendo la robustez metodológica y la aplicabilidad real del sistema en distintos contextos productivos (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización de la población del estudio

Categoría	Cantidad	Porcentaje	Descripción
Personal NEOS	10	20%	Ingenieros agrónomos y estudiantes becarios
Productores Chuquisaca	40	80%	Fungicultores del departamento
Total	50	100%	Muestra censal

Monitoreo ambiental automatizado

El sistema monitoreo los parámetros ambientales críticos con sensores específicos: DHT22 para temperatura ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($\pm 2-5\%$), MQ-135 para concentración de CO_2 ($\pm 10\%$) y LDR para intensidad lumínica ($\pm 5\%$). Estas mediciones permiten mantener condiciones óptimas para la colonización micelial y fructificación, esenciales para maximizar la productividad y calidad (Tabla 2).

Tabla 2. *Parámetros ambientales monitoreados*

Parámetro	Rango Óptimo	Sensor Utilizado	Precisión
6 Temperatura	18-25°C	DHT22	±0.5°C
Humedad Relativa	80-95%	DHT22	±2-5%
CO2	1000-2000 ppm	MQ-135	±10%
Luz	<200 lux	LDR	±5%

Rendimiento del modelo de inteligencia artificial

El modelo de redes neuronales convolucionales alcanzó una precisión del 94.2%, un recall del 92.8% y un F1-Score de 93.5%. El tiempo de detección se mantuvo por debajo de tres segundos. Estos resultados superan los objetivos iniciales y demuestran un desempeño sólido en la identificación automática de hongos contaminantes (Tabla 3).

Tabla 3. *Resultados de entrenamiento del Modelo CNN*

Métrica	Valor Obtenido	Objetivo	Estado
Precisión	94.2%	>90%	✓ Cumplido
Recall	92.8%	>90%	✓ Cumplido
F1-Score	93.5%	>90%	✓ Cumplido
Tiempo de Detección	<3 segundos	<5 segundos	✓ Cumplido

Evaluación funcional del sistema

El sistema logró un 97% de efectividad general en pruebas con usuarios reales, destacando un 100% en alertas automáticas, 96% en monitoreo ambiental, 95% en detección CNN y 97% en la interfaz móvil. Esto confirma la fiabilidad y robustez de los componentes tecnológicos integrados (Tabla 4).

Tabla 4. *Evaluación de funcionalidades del sistema*

Funcionalidad	Casos de Prueba	Exitosos	Porcentaje
Monitoreo Ambiental	25	24	96%
Detección CNN	20	19	95%
Alertas Automáticas	15	15	100%
Interfaz Móvil	30	29	97%
Total	90	87	97%

Impacto en la producción comercial

La implementación del sistema redujo en un 94% el tiempo de detección de contaminación (de 48-72 h a menos de 3 h), mejoró el control de temperatura en un 83% (reducción de la variación de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), disminuyó las pérdidas por contaminación en un 75% (de 15-20% a 3-5%) y optimizó el tiempo de respuesta en un 96% (de 24-48 h a tiempo real). Estos avances suponen mejoras significativas en la eficiencia y rentabilidad del cultivo (Tabla 5).

Tabla 5. Impacto en la Producción de NEOS

Indicador	Antes del Sistema	Después del Sistema	Mejora
Detección de Contaminación	Manual (48-72h)	Automática (<3h)	94% reducción
Control de Temperatura	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	83% mejora
Pérdidas por Contaminación	15-20%	3-5%	75% reducción
Tiempo de Respuesta	24-48h	Tiempo real	96% mejora

Síntesis y validación

Los datos confirman que la integración de CNN, IoT y BPM en un sistema único proporciona un monitoreo continuo eficiente, control automatizado y una toma de decisiones informada que supera los métodos tradicionales. La estabilidad, confiabilidad y sostenibilidad del sistema se comprobaron durante 12 semanas de evaluación piloto, con una aceptación del 94% entre los usuarios y una proyección de retorno económico del 180% en el primer año. Estos resultados sustentan la viabilidad técnica y comercial, posicionando esta solución como una propuesta valiosa para la agricultura de precisión en cultivos especializados.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio confirman de manera contundente la efectividad transformadora de integrar tecnologías emergentes en la producción agrícola especializada, especialmente en el contexto de la fungicultura comercial. En particular, la precisión del 94.2% alcanzada por el modelo de redes neuronales convolucionales para detectar automáticamente hongos contaminantes coincide con los reportes de Mendoza-Bernal et al. (2024), quien evidenció precisiones superiores al 90% en la detección de anomalías agrícolas mediante arquitecturas CNN optimizadas. Esta coincidencia valida la aplicabilidad de las CNN en ámbitos agrícolas especializados y destaca la superioridad de los sistemas de inteligencia artificial frente a los métodos manuales tradicionales. Además, el diseño de la arquitectura incorporó técnicas de aumento de datos, regularización para evitar sobreajuste y validación cruzada estratificada, fortaleciendo la evaluación objetiva del modelo (Mansoor et al., 2025).

Por otra parte, la efectividad del 96% en el monitoreo ambiental automatizado con sensores IoT confirma los hallazgos de Postolache et al. (2022); Quy et al. (2022) y Elewi et al. (2024), quienes demostraron que los sistemas IoT ofrecen datos más precisos y continuos en comparación con la monitorización convencional. La integración de sensores como DHT22, MQ-135 y LDR

videnció una confiabilidad superior a los sistemas manuales, en línea con las observaciones de Mandal et al. (2025) y Singh et al. (2025). La reducción del 75% en pérdidas por contaminación supera los resultados de Balan et al. (2022), quienes reportaron disminuciones del 60-70% a través de sistemas automatizados. Esta mejora adicional resulta de la integración sinérgica de múltiples tecnologías (IoT, CNN, BPM), que fortalecen las capacidades de detección y respuesta robustas. Así, el estudio aporta un avance en comparación con la literatura previa.

En relación con el control térmico, la mejora del 83% concuerda con las investigaciones de Bwambale et al. (2022); Badoni y Siddiqui (2025a), quienes identificaron reducciones semejantes en variaciones térmicas mediante la automatización. Esta estabilización resulta fundamental en fungicultura, dado que las fluctuaciones térmicas afectan procesos críticos como la colonización micelial y la fructificación. Asimismo, la efectividad del 100% en alertas automáticas supera los rangos típicos del 85-95% mencionados por Miller et al. (2025). Este rendimiento sobresaliente proviene del diseño específico para condiciones fungícolas y la calibración basada en datos empíricos locales, lo que garantiza notificaciones inmediatas y confiables.

El impacto en la reducción del tiempo de detección, con una mejora del 94%, representa un avance significativo en la gestión de riesgos productivos. Getahun et al. (2024); Badoni y Siddiqui (2025b) reconocen la detección temprana como clave para limitar pérdidas masivas, por lo que este resultado fortalece la propuesta tecnológica del estudio. Sin embargo, este trabajo presenta ciertas limitaciones que conviene señalar. La muestra se restringió a 50 participantes en la región de Chuquisaca, el enfoque se limitó a hongos ostra, el período de evaluación fue breve y el análisis económico resulta preliminar. Por tanto, se recomienda desarrollar estudios longitudinales que permitan evaluar la sostenibilidad y replicabilidad a largo plazo.

La relevancia de estos resultados trasciende la empresa NEOS, al proporcionar un marco referencial útil para implementaciones similares en otras empresas fungícolas y sistemas agrícolas especializados. En conjunto, los hallazgos apoyan la digitalización agrícola y confirman el potencial transformador de las tecnologías emergentes en la agricultura de precisión.

CONCLUSIONES

La presente investigación alcanzó su objetivo principal al diseñar e implementar una aplicación móvil agrícola que integra redes neuronales convolucionales para optimizar el control de información en la producción de hongos comestibles. Los datos respaldan que la combinación sinérgica de inteligencia artificial, Internet de las Cosas y sistemas de gestión de procesos de negocio constituye una estrategia viable y efectiva para transformar los métodos tradicionales en la fungicultura. El sistema desarrollado logró monitorear continuamente, detectar contaminaciones de forma automática y controlar con precisión las condiciones ambientales, confirmando que la digitalización puede revolucionar la agricultura especializada mediante herramientas inteligentes.

Metodológicamente, esta investigación aporta al campo del desarrollo de sistemas agrícolas inteligentes al validar enfoques híbridos que combinan aprendizaje profundo con arquitecturas IoT distribuidas. La aplicación de la metodología ágil Scrum para el desarrollo de sistemas BPM en agricultura especializada proporciona un marco replicable para la implementación de soluciones tecnológicas complejas en entornos productivos reales. Asimismo, el estudio amplió el conocimiento sobre la aplicación de redes neuronales convolucionales en la detección de patógenos agrícolas, evidenciando que la visión artificial supera consistentemente la precisión, objetividad y tiempos de respuesta de los métodos tradicionales de inspección visual manual.

Desde una perspectiva práctica, los hallazgos trascienden la fungicultura y establecen bases técnicas y teóricas para la transformación digital del sector agrícola regional. Los resultados indican que pequeñas y medianas empresas pueden adoptar tecnologías avanzadas sin requerir inversiones

elevadas ni habilidades técnicas previas especializadas. La solución tecnológica desarrollada ofrece un modelo escalable y adaptable, susceptible de replicación en diversos contextos de cultivo especializado, contribuyendo a un sector agrícola más eficiente, competitivo y sostenible. La integración coherente de múltiples tecnologías emergentes aporta evidencia empírica sobre la viabilidad de estrategias integrales de digitalización en la agricultura de precisión.

Además, esta investigación abre perspectivas para futuros desarrollos en áreas complementarias, como predicción climática automatizada, interfaces de realidad aumentada para diagnóstico agrícola, sistemas de trazabilidad basados en blockchain y arquitecturas de aprendizaje automático avanzadas. Los resultados sugieren que la evolución hacia sistemas agrícolas plenamente autónomos e inteligentes es tanto técnicamente factible como económicamente rentable, marcando un camino claro hacia la modernización integral del sector agrícola a través de la adopción sistemática de tecnologías innovadoras.

No obstante, se identificaron limitaciones que merecen consideración para la interpretación de los resultados. La muestra reducida, confinada a 50 participantes en la región de Chuquisaca, limita la generalización a otras zonas geográficas y tipos de hongos. El enfoque en hongos ostra y el período breve de evaluación restringen la capacidad para analizar la sostenibilidad y eficacia del sistema en el largo plazo. Asimismo, el análisis económico requiere un desarrollo más profundo para cuantificar con mayor precisión el retorno de inversión y costos asociados.

Por tanto, esta investigación establece un marco sólido y replicable que puede impulsar la innovación tecnológica en la agricultura especializada. Las evidencias obtenidas invitan a continuar con estudios longitudinales y ampliaciones del sistema para consolidar la modernización digital del sector agrícola, favoreciendo la seguridad alimentaria y el desarrollo económico sostenible mediante la innovación tecnológica.

REFERENCIAS

- Badoni, A., & Siddiqui, M. H. (2025a). Nutritional, medicinal, and economic potential of edible mushrooms: A global perspective. *Journal of Agricultural Science*, 15(2), 123-135. <https://doi.org/10.3390/plants14152364>
- Badoni, A., y Siddiqui, M. H. (2025b). Metamorphosis of mushroom production from tradition to automation. *Discover Applied Sciences*, 7(974). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07517-w>
- Balan, V., Zhu, W., Krishnamoorthy, H., Benhaddou, D., Mowrer, J., Husain, H., & Eskandari, A. (2022). Challenges and opportunities in producing high-quality edible mushrooms from lignocellulosic biomass in a small scale. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(4), 1355-1374. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11749-2>
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
- Elewi, A., Al-Jubouri, M., y Hassan, R. (2024). Design and implementation of a cost-aware and smart oyster mushroom farming system based on IoT and machine learning. *Smart Agricultural*

- Technology, 8, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100443>
- Getahun, S., Kefale, H., & Gelaye, Y. (2024). Application of precision agriculture technologies for sustainable crop production and environmental sustainability: A systematic review. *The Scientific World Journal*, 2024(1), 2126734. <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>
- 10 Gupta, A., & Singh, A. (2022). An intelligent healthcare cyber physical framework for encephalitis diagnosis based on information fusion and soft-computing techniques. *New Generation Computing*, 40(4), 1093-1123. <https://doi.org/10.1007/s00354-022-00175-1>
- Kewessa, G., Dejene, T., Alem, D., Tolera, M., & Martín-Pinto, P. (2022). Forest type and site conditions influence the diversity and biomass of edible macrofungal species in Ethiopia. *Journal of Fungi*, 8(10), 1023. <https://doi.org/10.3390/jof8101023>
- Mandal, S., Yadav, A., Panme, F. A., Devi, K., y Kumar, S. (2024). Adaption of smart applications in agriculture to enhance production. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>
- Mansoor, S., Rahman, A., y Li, J. (2025). Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1587869. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
- Mendoza-Bernal, J., González-Vidal, A., & Skarmeta, A. F. (2024). A convolutional neural network approach for image-based anomaly detection in smart agriculture. *Expert Systems with Applications*, 247, 123210. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123210>
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durlík, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(12), 3583. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
- Mowla, M. N., Mowla, N., Shah, A. S., Rabie, K. M., & Shongwe, T. (2023). Internet of Things and wireless sensor networks for smart agriculture applications: A survey. *IEEe Access*, 11, 145813-145852. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10371307>
- Padhiary, M., Kumar, A., & Sethi, L. N. (2025). Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture. *Discover Robotics*, 1(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44430-025-00006-0>
- Postolache, S., Sebastião, P., Viegas, V., Postolache, O., & Cercas, F. (2022). IoT-based systems for soil nutrients assessment in horticulture. *Sensors*, 23(1), 403. <https://doi.org/10.3390/s23010403>
- Quy, V. K., Hau, N. V., Anh, D. V., Quy, N. M., Ban, N. T., Lanza, S., ... & Muzirafuti, A. (2022). IoT-enabled smart agriculture: architecture, applications, and challenges. *Applied Sciences*, 12(7), 3396. <https://doi.org/10.3390/app12073396>
- Rejeb, A., Keogh, J. G., Zailani, S., Treiblmaier, H., & Rejeb, K. (2020). Blockchain technology in the food industry: A review of potentials, challenges and future research directions. *Logistics*, 4(4), 27. <https://doi.org/10.3390/logistics4040027>
- Singh, K., Yadav, M., Singh, Y., & Moreira, F. (2025). Techniques in reliability of internet of things (IoT). *Procedia Computer Science*, 256, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.095>
- Sofiev, M., Buters, J., Tummon, F., Fatahi, Y., Sozinova, O., Adams-Groom, B., ... & Clot, B. (2023). Designing an automatic pollen monitoring network for direct usage of observations to reconstruct the concentration fields. *Science of the Total Environment*, 900, 165800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165800>
- Yang, Z. Y., Xia, W. K., Chu, H. Q., Su, W. H., Wang, R. F., & Wang, H. (2025). A comprehensive review of deep learning applications in cotton industry: From field monitoring to smart processing. *Plants*, 14(10), 1481. <https://doi.org/10.3390/plants14101481>

