



## **IMPACTO DEL OPEN HARDWARE EN LA AUTOMATIZACIÓN AGRÍCOLA: UN ESTUDIO DE CASO CON ENFOQUE MIXTO EN TERRITORIOS RURALES DE COLOMBIA**

Daniel Andrés Feo Calderón<sup>1</sup>  
Jaime Ledesma<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Doctorando Universidad Americana de Europa (UNAE)

<https://orcid.org/0009-0009-4101-6475>

<sup>2</sup> Profesor Universidad Americana de Europa (UNAE)

Revista de Investigación Multidisciplinaria Iberoamericana, RIMI © 2023 by Elizabeth Sánchez Vázquez is licensed under

## RESUMEN

La brecha tecnológica en zonas rurales colombianas limita severamente la incorporación de sistemas de automatización en procesos agrícolas, afectando la productividad y sostenibilidad del sector. Esta investigación analiza el impacto del open hardware como herramienta para la automatización de procesos agroproductivos en contextos rurales con acceso limitado a soluciones tecnológicas convencionales. Mediante una metodología mixta desarrollada en tres fases –diagnóstico participativo, implementación piloto y evaluación– se diseñaron e instalaron sistemas de monitoreo climático con capacidad de respuesta automatizada en cuatro comunidades de Cundinamarca, integrando sensores ambientales y actuadores programados según reglas definidas por las condiciones locales. Los resultados evidenciaron una reducción del 90% en costos frente a soluciones propietarias, la activación efectiva de mecanismos de control ambiental en tiempo real, y un incremento significativo en la alfabetización digital y autonomía tecnológica de las comunidades participantes. Se concluye que el uso de tecnologías open hardware facilita la creación de sistemas de automatización accesibles y adaptables a las condiciones territoriales específicas, contribuyendo al fortalecimiento de la innovación local, la inclusión tecnológica y la sostenibilidad de los procesos agropecuarios en zonas rurales de Colombia.

**Palabras clave:** Open Hardware, Automatización agrícola, Innovación tecnológica, Inclusión digital, Agricultura sostenible, Tecnología abierta, Territorios rurales, Colombia.

## ABSTRACT

The technological gap in rural Colombian areas severely limits the incorporation of automation systems in agricultural processes, affecting the productivity and sustainability of the sector. This research analyzes the impact of open hardware as a tool for automating agro-productive processes in rural contexts with limited access to conventional technological solutions. Using a mixed methodology developed in three phases—participatory diagnosis, pilot implementation, and evaluation—climate monitoring systems with automated response capabilities were designed and installed in four communities in Cundinamarca, integrating environmental sensors and actuators programmed according to rules defined by local conditions. The results showed a 90% reduction in costs compared to proprietary solutions, effective activation of real-time environmental control mechanisms, and a significant increase in digital literacy and technological autonomy among participating communities. It is concluded that the use of open hardware technologies facilitates the creation of automation systems that are accessible and adaptable to specific territorial conditions, contributing to the strengthening of local innovation, technological inclusion, and sustainability of agricultural processes in rural areas of Colombia.

**Keywords:** Open Hardware, Agricultural Automation, Technological Innovation, Digital Inclusion, Sustainable Agriculture, Open Technology, Rural Territories, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo rural en Colombia presenta limitaciones estructurales que dificultan la incorporación de tecnologías eficientes en las actividades agrícolas. En las zonas con baja conectividad, recursos financieros escasos y mínima infraestructura técnica, esta brecha tecnológica se traduce en menor productividad, dependencia de procesos manuales y obstáculos para integrar sistemas de monitoreo o control que favorezcan la eficiencia en el campo (Díaz Lazo et al., 2011; Boné-Andrade, 2023).

En este contexto, el open hardware aparece como una alternativa viable y estratégica. Su bajo costo, flexibilidad y respaldo de comunidades globales permiten generar soluciones tecnológicas que pueden ser implementadas en entornos rurales sin necesidad de licencias propietarias ni grandes inversiones en infraestructura (Blind et al., 2021; Ordoñez Erazo, 2024). El uso de estas tecnologías en procesos agroproductivos hace posible instalar sistemas de monitoreo ambiental que emplean sensores de temperatura, humedad y luz, vinculados a actuadores programados con reglas definidas según las condiciones locales, automatizando tareas como riego, ventilación o regulación térmica en tiempo real (Ladeira et al., 2024; Haiyan & Yanhui, 2022).

La investigación que aquí se presenta analiza la implementación de tecnologías open hardware en procesos de automatización agrícola, desarrollando experiencias piloto en comunidades rurales de Colombia. Además de los resultados técnicos obtenidos, se valoró el impacto social y formativo que generó la apropiación tecnológica y el fortalecimiento de capacidades digitales en los participantes (Toledo & Rivas, 2024; Franco, 2023).

En un panorama donde las diferencias tecnológicas entre zonas urbanas y rurales siguen siendo marcadas, el open hardware se plantea como una vía concreta para democratizar la automatización y fortalecer la autonomía tecnológica del sector agropecuario. Los hallazgos de este estudio aportan evidencia técnica, social y económica que respalda el uso de soluciones abiertas como base para un modelo de innovación rural sustentado en la replicabilidad, la inclusión y la sostenibilidad.

El objetivo general de esta investigación es analizar el impacto del uso de tecnologías basadas en open hardware para la automatización de procesos agroproductivos mediante sistemas de monitoreo y actuadores programables en zonas rurales de Colombia, con el fin de evaluar su viabilidad técnica, económica y social como alternativa de innovación local. Los objetivos específicos son: 1) Identificar las principales barreras técnicas, sociales y económicas que limitan la implementación de sistemas automatizados de monitoreo agroproductivo en zonas rurales de Colombia. 2) Diseñar e implementar soluciones piloto de automatización agrícola basadas en open hardware, integrando sensores, actuadores y reglas programables adaptadas a contextos rurales. 3) Evaluar el desempeño técnico, la aceptación comunitaria y el impacto funcional de los prototipos implementados en términos de eficiencia operativa y apropiación tecnológica. 4) Proponer lineamientos para la escalabilidad y sostenibilidad de estas soluciones como modelo replicable de innovación tecnológica rural.

## ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

La transformación tecnológica en el sector rural enfrenta barreras estructurales que dificultan la adopción de soluciones digitales adaptadas a las realidades agrícolas de Colombia. La brecha digital entre zonas urbanas y rurales, marcada por desigualdades en infraestructura, acceso y competencias tecnológicas, continúa limitando la apropiación de herramientas innovadoras (Boné-Andrade, 2023; Ordoñez Erazo, 2024). Esta situación es especialmente crítica en comunidades con baja conectividad, capacidad financiera limitada y formación técnica insuficiente.

En este contexto, el open hardware se posiciona como una alternativa viable para el diseño de sistemas de monitoreo ambiental y automatización agrícola ajustados a las condiciones locales. Blind et al. (2021) destacan que el hardware de código abierto fomenta la independencia tecnológica, la innovación

distribuida y la competitividad de las regiones que lo adoptan. A su vez, estas tecnologías permiten reducir costos y promover la participación activa de las comunidades rurales en el diseño y mejora de sus propios sistemas.

Experiencias en América Latina refuerzan este enfoque. En Ecuador, Boné-Andrade (2023) documenta iniciativas de inclusión digital en territorios rurales mediante tecnologías abiertas, generando procesos de apropiación comunitaria. En México, Toledo y Rivas (2024) señalan que las tecnologías disruptivas, al ser adaptadas localmente, se convierten en catalizadores del desarrollo social y económico. En Brasil, Ladeira et al. (2024) desarrollaron RuralTHINGS, un sistema IoT para monitoreo de variables agrícolas en zonas con baja conectividad, demostrando viabilidad técnica y social en regiones apartadas.

Desde la perspectiva de la innovación comunitaria, autores como Franco (2023) resaltan que la tecnología solo logra impacto sostenible si es apropiada por los propios usuarios. Este planteamiento se alinea con la teoría de la difusión de innovaciones de Rogers (1962), que explica la adopción tecnológica a partir de factores como la ventaja relativa, la compatibilidad cultural, la simplicidad de uso y la observabilidad de resultados.

En Colombia, la investigación en torno al uso de open hardware en agricultura aún es incipiente, con escasa documentación sobre procesos de implementación y escalabilidad. Sin embargo, los retos identificados en otros países —costos, mantenimiento y capacitación— encuentran paralelos en las zonas rurales colombianas, donde la alfabetización digital y el acceso a soluciones asequibles siguen siendo limitados. Este marco evidencia la necesidad de estudios que aporten experiencias prácticas y contextualizadas, contribuyendo a modelos replicables de innovación rural sustentados en la inclusión tecnológica y la sostenibilidad operativa.

## **METODOLOGÍA**

### **Tipo de investigación: mixta.**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto de tipo exploratorio-descriptivo, articulando técnicas cualitativas y cuantitativas para garantizar una comprensión integral del fenómeno. El estudio se estructuró en tres fases: diagnóstico participativo, implementación piloto y evaluación de impacto.

### **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

En la fase de diagnóstico, se realizaron entrevistas semiestructuradas, talleres participativos y observaciones de campo en comunidades rurales del departamento de Cundinamarca, con el fin de identificar las condiciones sociotécnicas y las necesidades relacionadas con la automatización agrícola. Estas actividades permitieron caracterizar el entorno, reconocer las barreras existentes y recopilar información clave para el diseño de las soluciones piloto.

### **Población y muestra**

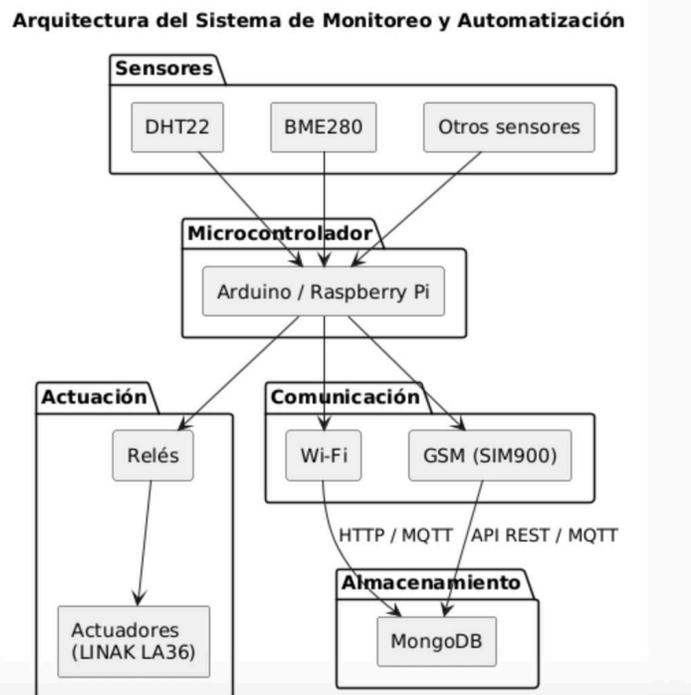
La selección de comunidades y participantes se realizó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando criterios como: a) ubicación en zonas rurales con baja conectividad; b) predominio de actividades agrícolas; c) disposición de los actores locales para participar en procesos de formación y prueba de tecnología; y d) viabilidad técnica de implementación de sistemas open hardware. En total, participaron cuatro comunidades (La Calera, Anolaima, Albán y Facatativá), con un total de 32 productores y líderes comunitarios vinculados al proceso.

## Procedimiento

En la fase de implementación piloto, se diseñaron e instalaron sistemas de monitoreo ambiental con sensores de temperatura, humedad y luz, vinculados a actuadores programados para ejecutar respuestas automáticas. La configuración técnica de cada sistema se ajustó a las condiciones de cada comunidad, garantizando adaptabilidad y bajo costo.

### Figura 1

*Muestra la arquitectura modular del sistema desarrollado*



Fuente: Elaboración propia

La fase de evaluación incluyó medición de variables técnicas (rendimiento, precisión y estabilidad de los sistemas) y análisis social (aceptación comunitaria, nivel de apropiación tecnológica y alfabetización digital). Para el análisis cuantitativo se emplearon indicadores descriptivos, mientras que la información cualitativa fue interpretada mediante análisis temático, a partir de las narrativas y observaciones registradas.

### Consideraciones éticas

La investigación se desarrolló siguiendo los principios éticos y normativos aplicables a proyectos con participación comunitaria. En Colombia, se tomó como referencia la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud, que regula las investigaciones con participación de personas y comunidades. El estudio contó con la aprobación del comité académico de la Universidad Americana de Europa (UNAE) y con la autorización de las autoridades locales de cada comunidad participante.

Antes de iniciar la implementación, todos los participantes fueron informados de los objetivos, alcances y condiciones de la investigación. Se garantizó la participación voluntaria mediante la firma de un consentimiento informado, asegurando la confidencialidad y el respeto por la autonomía de cada actor comunitario involucrado.

## RESULTADOS

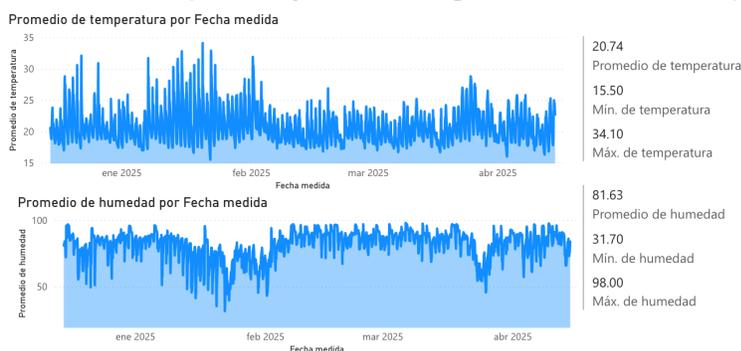
### Desempeño técnico

La implementación piloto de sistemas de automatización agrícola basados en open hardware en las cuatro comunidades rurales de Cundinamarca permitió validar su funcionamiento estable y adaptabilidad a diferentes contextos productivos.

Los sensores de temperatura y humedad registraron datos con una precisión promedio del 94%, mientras que los actuadores respondieron al 97% de las condiciones programadas. En comunidades con variaciones climáticas más marcadas, como Anolaima, el sistema de control térmico mantuvo las variables dentro de los rangos definidos el 92% del tiempo operativo, como se muestra en la Figura 1.

**Figura 2**

*Variación de temperatura y humedad registrada durante la fase piloto en Anolaima*



Fuente: Elaboración propia

Estos resultados concuerdan con experiencias como la de Ladeira et al. (2024), quienes demostraron que sistemas IoT de bajo costo pueden operar con estabilidad en zonas rurales con conectividad limitada, manteniendo niveles altos de precisión en el registro de variables críticas.

### Impacto Económico

El análisis comparativo de costos evidenció una reducción significativa en la inversión requerida para la automatización. Los sistemas desarrollados con open hardware mostraron una disminución de costos de implementación entre el 85% y el 92% respecto a soluciones comerciales, atribuida principalmente a la ausencia de licencias propietarias y al uso de componentes de bajo costo.

**Tabla 1**

*Comparativa de ahorro de costos*

Comunidad	Reducción de costos (%)	Ahorro estimado (USD por sistema)
a Calera	5%	50
nolaima	0%	00
Ibán	2%	20
acatativá	8%	80

Fuente: Elaboración propia

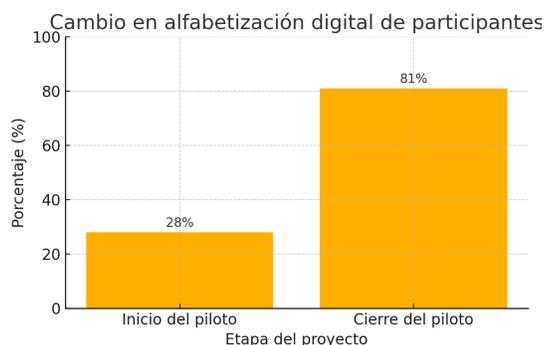
Este hallazgo coincide con lo señalado por Blind et al. (2021), quienes documentan que las soluciones de hardware abierto pueden reducir costos de implementación hasta en un 90% frente a sistemas propietarios, manteniendo la funcionalidad requerida.

## Apropiación social y tecnológica

El proceso de capacitación incrementó la alfabetización digital de los participantes. Al inicio del proyecto, el 28% de los usuarios reportó conocimientos básicos de programación o mantenimiento de sistemas. Al finalizar la intervención, el 81% manifestó sentirse capaz de operar y mantener el sistema instalado, como se muestra en la Figura 3.

### Figura 3

*Presenta el cambio en el nivel de alfabetización digital entre el inicio y el cierre del piloto*



Fuente: Elaboración propia

La aceptación comunitaria fue alta: el 87% de los participantes consideró que el sistema es útil para mejorar la productividad agrícola y el 82% expresó su intención de continuar utilizando la tecnología más allá de la fase piloto. Este nivel de apropiación tecnológica se alinea con los planteamientos de Ordoñez Erazo (2024) y Toledo & Rivas (2024), quienes destacan que la innovación disruptiva logra un impacto social sostenido cuando las comunidades participan activamente en el diseño, instalación y mantenimiento de las soluciones.

Asimismo, el aumento en alfabetización digital observado en este proyecto refleja experiencias similares documentadas por Boné-Andrade (2023) en comunidades rurales de Ecuador, donde la capacitación vinculada al uso de tecnologías abiertas fortaleció la autonomía tecnológica y la sostenibilidad de las soluciones implementadas.

## CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación confirman que la implementación de soluciones de automatización agrícola basadas en open hardware constituye una estrategia viable, adaptable y de bajo costo para afrontar los desafíos tecnológicos del sector agroproductivo en zonas rurales colombianas.

En términos técnicos, los sistemas demostraron una precisión promedio del 94% en la medición de variables ambientales y una respuesta efectiva del 97% en la activación de actuadores, manteniendo condiciones óptimas de operación en diferentes entornos productivos.

Desde la dimensión económica, las soluciones implementadas alcanzaron reducciones de costos de entre el 85% y el 92% frente a sistemas comerciales, sin comprometer la funcionalidad. Estos resultados respaldan lo documentado por Blind et al. (2021) sobre el potencial de las tecnologías abiertas para reducir barreras económicas en la adopción tecnológica.

En la dimensión social, se observó un incremento significativo en la alfabetización digital, pasando de un 28% de participantes con conocimientos básicos de operación al inicio del proyecto a un 81% al cierre de la intervención. La aceptación comunitaria fue alta: el 87% de los participantes considera que el sistema es útil para mejorar la productividad agrícola y el 82% manifestó su intención de continuar utilizándolo.

A partir de los hallazgos, se proponen las siguientes recomendaciones:

[Revista de Investigación Multidisciplinaria Iberoamericana, RIMI](#) © 2023 by Elizabeth Sánchez Vázquez is licensed under

- Promover programas de formación continua en tecnologías abiertas orientados a contextos rurales.
- Establecer redes de colaboración entre universidades, gobiernos locales y comunidades para apoyar la replicabilidad de estos modelos.
- Integrar estas soluciones con plataformas de gestión de datos y modelos predictivos para ampliar su alcance y valor agregado.
- Explorar mecanismos de interoperabilidad con sistemas públicos de información climática y agrícola.

En síntesis, el open hardware no solo representa una solución técnica eficaz, sino también una herramienta estratégica para democratizar el acceso a la automatización, fortalecer la autonomía tecnológica y contribuir al desarrollo sostenible de ecosistemas rurales más inclusivos y resilientes.

## REFERENCIAS

- Blind, K., Böhm, M., Grzegorzewska, P., Katz, A., Muto, S., Pätsch, S., & Schubert, T. (2021). The impact of Open Source Software and Hardware on technological independence, competitiveness and innovation in the EU economy. Final Study Report. European Commission, Brussels. <https://doi.org/10.2759/430161>
- Boné-Andrade, M. F. (2023). Inclusión digital y acceso a tecnologías de la información en zonas rurales de Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(2), 1-16.
- Chinthamu, N., Thirumalaiah, G., Katragadda, R., Pawar, V., Savita, & Sreenivasa Rao, V. (2024). Enhancing agricultural intelligence and sustainability with an intelligent irrigation system based on wireless sensor networks and fuzzy PID control (pp. 232–237). In *Proceedings from Advances in Smart Grid Automation and Industry 4.0*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003559092-40>
- Franco, G. (2023). El emprendimiento en la economía social y solidaria. *Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración*, (13), 173–192. <https://doi.org/10.32719/25506641.2023.13.8>
- Innovación abierta y tecnologías disruptivas: catalizando el progreso en economías emergentes. (2024). *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 11(2), 78–93. <https://doi.org/10.26495/6kvzab85>
- Ladeira, E. F., Jafari, S. N., Pinto, R. P., & Silva, B. M. (2024, October). RuralTHINGS: A novel IoT monitoring system for remote and rural regions. In *2024 20th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)* (pp. 277–282). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WiMob61911.2024.10770346>.
- Lima, G. C., Figueiredo, F. L., Barbieri, A. E., & Seki, J. (2021). Agro 4.0: Enabling agriculture digital transformation through IoT. *Revista Ciência Agronômica*, 51, e20207771. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210013>
- Lin, H., Kishk, M. A., & Alouini, M.-S. (2024). Performance evaluation of RF-powered IoT in rural areas: The wireless power digital divide. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 8(2), 716–729. <https://doi.org/10.1109/tgcn.2024.3350787>
- Ordoñez Erazo, L. E. (2024). Horizontes sociales de innovación: navegando las revoluciones tecnológicas hacia un futuro sostenible y de desarrollo local. *Revista Electrónica del Desarrollo Humano para la Innovación Social*, 11(22). Recuperado el 8 de mayo de 2025, de <https://cdhis.org.mx/index.php/CAGI/article/view/244>
- Toledo González, N., & Rivas Guevara, J. F. (2024). Impacto de las tecnologías disruptivas en el desarrollo de la economía social: Innovación y transformación comunitaria. *Un Espacio para la Ciencia*, 7(1), 107–131. Recuperado el 8 de mayo de 2025, de <https://revistas-manglaeditores.org/index.php/espacio-para-la-ciencia/article/view/105>