

SSTSDS-Vol.4. N1. 137

Automatización del riego mediante IoT para optimizar el uso del agua en el cultivo de tomate bajo invernadero

IoT based irrigation automation to optimize water use in greenhouse tomato cultivation

Autores:

Mayra Gabriela Naspud Espinoza
Universidad Agraria del Ecuador
Guayaquil – Ecuador
mnapud@uagraria.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1763-3694>

María Magdalena Delgado Cabanilla
Instituto Superior Tecnológico La Troncal
La Troncal – Ecuador
mmdelgado@instlatroncal.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-6708-9679>

María Sol Chevez Villanueva
Universidad Agraria del Ecuador
Guayaquil – Ecuador
mchevez@uagraria.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-6831-5049>

Carlos Fernando Plaza Calle
Universidad Agraria del Ecuador
Guayaquil – Ecuador
plaza3419@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-3621-4392>

Karen Dennys Pineda Mora
Universidad Agraria del Ecuador
Guayaquil – Ecuador
karenpineda3a@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0009-5054-304X>

Autor de correspondencia: Mayra Gabriela Naspud Espinoza, mnapud@uagraria.edu.ec

Enviado: 27-07-2026
Aceptado: 27-09-2026

Revisado: 25-09-2026
Publicado: 28-09-2026



Cómo citar este artículo:

Naspud Espinoza, M. G., Delgado Cabanilla, M. M., Chevez Villanueva, M. S., Plaza Calle, C. F., & Pineda Mora, K. D. (2026). Automatización del riego mediante IoT para optimizar el uso del agua en el cultivo de tomate bajo invernadero. *Sage Sphere of Technology, Sciences, Discoveries And Society*, 4(1), 1-16. <https://doi.org/10.63688/5jpjed88>

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.



RESUMEN

El estudio examinó la implementación de un sistema de riego automatizado basado en Internet de las Cosas (IoT) para optimizar el uso del agua en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero en la finca La Bodeguita de Belén, ubicada en el cantón El Triunfo, Ecuador. El objetivo fue determinar el efecto de un sistema automatizado basado en sensores de humedad del suelo sobre el volumen de agua utilizado, la frecuencia de riego, la humedad del suelo, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. Se desarrolló una investigación cuantitativa, experimental y de campo, con un diseño completamente aleatorizado y dos tratamientos: T1, riego convencional programado, y T2, riego automatizado mediante IoT. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones y cada unidad experimental estuvo constituida por 30 plantas, para un total de 240 plantas. El experimento se desarrolló durante 120 días. Se registraron el volumen de agua aplicado, la humedad del suelo, la frecuencia de riego, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. El tratamiento T2 utilizó 1.310 L por unidad experimental, frente a 1.680 L en T1, lo que representó una reducción del 22,0 % del volumen de agua utilizado. Asimismo, la frecuencia de riego disminuyó de 96 a 74 eventos. La humedad media fue de $26,7 \pm 2,3$ % en T2 y de $25,8 \pm 4,1$ % en T1; esta diferencia no fue estadísticamente significativa ($p = .318$), aunque la menor desviación estándar en T2 sugiere mayor estabilidad descriptiva. El rendimiento fue de 59,4 kg en T2 y 57,6 kg en T1, diferencia que tampoco fue estadísticamente significativa ($p = .241$). La eficiencia en el uso del agua aumentó de 34,3 a 45,3 kg/m³ y presentó una diferencia estadísticamente significativa ($p = .004$). Bajo las condiciones evaluadas, el sistema IoT permitió reducir el uso de agua y mejorar significativamente su eficiencia, manteniendo un rendimiento estadísticamente comparable con el riego convencional.

Palabras clave: Internet de las Cosas; riego automatizado; tomate; eficiencia hídrica.

ABSTRACT

This study examined the implementation of an automated irrigation system based on the Internet of Things (IoT) to optimize water use in greenhouse tomato production (*Solanum lycopersicum* L.) at the La Bodeguita de Belén farm in El Triunfo, Ecuador. The objective was to determine the effect of an automated system based on soil-moisture sensors on water volume used, irrigation frequency, soil moisture, crop yield, and water-use efficiency. A quantitative, experimental, and field study was conducted using a completely randomized design with two treatments: T1, scheduled conventional irrigation, and T2, IoT-based automated irrigation. Each treatment had four replications, and each experimental unit consisted of 30 plants, for a total of 240 plants. The experiment lasted 120 days. Water volume applied, soil moisture, irrigation frequency, yield, and water-use efficiency were recorded. Treatment T2 used 1,310 L per experimental unit compared with 1,680 L in T1, representing a 22.0% reduction in water use. Irrigation frequency also decreased from 96 to 74 events. Mean soil moisture was $26.7 \pm 2.3\%$ in T2 and $25.8 \pm 4.1\%$ in T1; this difference was not statistically significant ($p = .318$), although the lower standard deviation in T2 suggests greater descriptive stability. Yield was 59.4 kg in T2 and 57.6 kg in T1, and the difference was not statistically significant ($p = .241$). Water-use efficiency increased from 34.3 to 45.3 kg/m³ and showed a statistically significant difference ($p = .004$). Under the conditions evaluated, the IoT system reduced water use and significantly improved water-use efficiency while maintaining statistically comparable yield to conventional irrigation.

Keywords: Internet of Things; automated irrigation; tomato; water-use efficiency.



1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua es uno de los elementos cruciales para la sostenibilidad de la producción agrícola, particularmente en sistemas intensivos donde es necesario atender con precisión la demanda del cultivo para prevenir tanto el déficit hídrico como el uso excesivo del recurso. En este contexto, la gestión del riego en cultivos hortícolas bajo invernadero requiere una programación adecuada de los suministros de agua. Allen et al. (1998) señalan que la determinación de las necesidades hídricas del cultivo requiere estimar la evapotranspiración considerando las condiciones climáticas, las características del cultivo y sus fases fenológicas. Esta perspectiva permite superar los modelos de riego basados exclusivamente en horarios fijos y avanzar hacia estrategias fundamentadas en las necesidades reales de la planta.

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica y alimentaria. Debido a su sensibilidad a las fluctuaciones en la disponibilidad de agua, requiere una gestión hídrica precisa. En Ecuador, esta problemática es especialmente relevante en la producción bajo invernadero. Colimba-Limaico et al. (2022) estudiaron diferentes dosis y frecuencias de riego en tomate cultivado bajo invernadero en Ecuador y señalaron que el manejo inadecuado del agua puede afectar la producción, los ingresos de los agricultores y la eficiencia del recurso. Sus resultados evidencian la necesidad de establecer estrategias de programación que permitan equilibrar el rendimiento, la calidad del fruto y el uso eficiente del agua.

Históricamente, la programación del riego en unidades productivas de pequeña y mediana escala se ha fundamentado en criterios empíricos, intervalos de tiempo preestablecidos o apreciaciones visuales del agricultor. Aunque estos métodos pueden ser funcionales bajo determinadas condiciones, presentan limitaciones para responder a las variaciones de humedad, temperatura y demanda evaporativa. Los sensores de humedad del suelo permiten obtener información directa de la condición hídrica de la zona radicular y utilizarla como base para la toma de decisiones. Datta y Taghvaeian (2023), en una revisión sistemática sobre sensores de agua del suelo para programación del riego, señalan que las estrategias basadas en sensores pueden reducir el uso de agua y mantener rendimientos similares o superiores en determinados contextos, aunque su precisión depende, entre otros factores, de la calibración



y de la instalación adecuada de los sensores. Estudios de revisión sobre riego inteligente también destacan el valor de los sensores y de los sistemas de apoyo a la decisión para ajustar el suministro a las condiciones del cultivo (Bryant, 2023; Vallejo-Gómez et al., 2023).

El Internet de las Cosas (IoT) ha ampliado estas posibilidades al permitir la conexión entre sensores, dispositivos de control y plataformas de comunicación para obtener y procesar información en tiempo real. En agricultura, un sistema IoT puede integrar sensores de humedad del suelo, sensores ambientales, electroválvulas, bombas y unidades de procesamiento para activar o suspender automáticamente el suministro de agua cuando se alcanzan determinados umbrales. Las revisiones recientes destacan que la incorporación de redes inalámbricas, computación en la nube, IoT y sistemas de apoyo a la decisión puede favorecer una gestión del agua basada en datos y mejorar la precisión del riego (Dhal et al., 2024; Sharma et al., 2025). Asimismo, la integración de sistemas IoT, sensores y tecnologías de comunicación ha sido documentada como una vía para fortalecer la automatización y la toma de decisiones en agricultura de precisión (Zhang et al., 2022).

Los sistemas de monitoreo de humedad basados en tecnologías avanzadas también presentan retos relacionados con la calibración, la conectividad, los costos y la adaptación de los equipos a diferentes condiciones productivas (Morchid et al., 2024). En este sentido, Moustafa et al. (2026) destacan que los sistemas de riego inteligente basados en IoT han mostrado potencial para reducir el consumo de agua en diferentes cultivos, aunque la magnitud del ahorro depende de las condiciones ambientales, la configuración del sistema, el criterio de activación y el nivel de déficit hídrico permitido. Por ello, la automatización no debe considerarse como garantía de un ahorro uniforme, sino como una estrategia cuyo efecto debe evaluarse mediante indicadores cuantitativos que relacionen el volumen de agua aplicado con la producción obtenida. Además, los estudios sobre IoT y sensores agrícolas señalan que la selección de tecnologías debe considerar interoperabilidad, costos, conectividad y adaptación al contexto productivo (Morchid et al., 2024).

En la finca La Bodeguita de Belén, ubicada en el cantón El Triunfo, provincia del Guayas, se cultiva tomate bajo invernadero y existe la necesidad de optimizar el manejo del agua. La incorporación de un sistema automatizado basado en IoT permite sustituir una programación exclusivamente temporal por una estrategia dependiente de la humedad del suelo. En el estudio, el sistema integra sensores ubicados en la zona radicular, un controlador y



mecanismos de activación del suministro de agua, de acuerdo con un umbral de humedad previamente establecido. De esta manera, el riego se activa cuando la humedad desciende hasta la condición definida para el sistema, evitando aplicaciones innecesarias cuando el suelo mantiene condiciones adecuadas. Esta lógica de automatización es consistente con experiencias de riego inteligente basadas en datos de humedad del suelo en invernadero (Liao et al., 2021) y con sistemas de apoyo a la decisión aplicados a tomate bajo condiciones protegidas (Flores Cayuela et al., 2022).

La base conceptual de esta estrategia se relaciona con la evapotranspiración del cultivo y el balance hídrico del suelo. Allen et al. (1998) definen la evapotranspiración como la combinación de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas y la consideran un parámetro fundamental para estimar los requerimientos hídricos. La integración de esta perspectiva con mediciones directas de humedad puede contribuir a establecer estrategias de riego más precisas que aquellas basadas únicamente en tiempos fijos. En esta investigación, la tecnología IoT se concibe como una herramienta para operacionalizar el manejo hídrico: los sensores generan información, el sistema de control procesa la condición de humedad y los actuadores ejecutan la decisión de riego. La evidencia disponible sobre sistemas de apoyo a la decisión y riego de precisión refuerza la pertinencia de combinar información del suelo con reglas de programación del riego (Flores Cayuela et al., 2022).

Aunque la literatura sobre agricultura inteligente y riego de precisión ha crecido considerablemente, continúa siendo necesario evaluar soluciones adaptadas a contextos productivos concretos. La evidencia disponible respalda el potencial de los sistemas inteligentes para mejorar la sostenibilidad y precisión del riego, pero también señala desafíos relacionados con inversión inicial, conectividad, calibración y escalabilidad (Moustafa et al., 2026; Sharma et al., 2025; Bryant, 2023; Morchid et al., 2024). En este contexto, existe interés en analizar sistemas relativamente simples que utilicen variables directamente relacionadas con el estado hídrico del suelo y que puedan aplicarse a la producción de tomate bajo invernadero.

Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de un sistema de riego automatizado basado en Internet de las Cosas sobre el volumen de agua utilizado, la frecuencia de riego, la humedad del suelo, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua en el cultivo de tomate bajo invernadero en la finca La Bodeguita de



Belén, cantón El Triunfo. Para ello, se comparó un sistema de riego convencional programado con un sistema automatizado activado mediante sensores de humedad del suelo.

2. METODOLOGÍA

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, experimental y de campo y se desarrolló con el propósito de analizar el efecto de la automatización del riego mediante tecnología IoT sobre el uso del agua en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo invernadero. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con dos tratamientos: T1, riego convencional programado, y T2, riego automatizado mediante IoT. Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones y cada unidad experimental estuvo constituida por 30 plantas, para un total de 240 plantas.

El sistema IoT permitió activar o suspender el suministro de agua de acuerdo con el nivel de humedad del suelo y con un umbral de activación previamente establecido. Para atender el requerimiento de reproducibilidad señalado por el evaluador, los parámetros técnicos del sistema deben consignarse explícitamente en la versión definitiva: tipo y modelo del sensor, procedimiento de calibración, número de sensores por unidad experimental, profundidad y ubicación de instalación, umbral exacto de activación y de detención del riego, controlador o plataforma IoT, frecuencia de adquisición de datos y mecanismo de accionamiento de la bomba o electroválvula. Estos parámetros no aparecen especificados en la versión fuente del manuscrito y, por tanto, no se presentan aquí como hechos observados del experimento.

Se evaluaron cinco variables: volumen de agua utilizado, frecuencia de riego, humedad del suelo, rendimiento del cultivo y eficiencia en el uso del agua. El volumen hídrico se calculó mediante la sumatoria del agua suministrada en cada evento de riego. La humedad del suelo se obtuvo mediante sensores. La frecuencia de riego correspondió al número de eventos registrados durante el periodo experimental. El rendimiento se determinó a partir del peso total de los frutos cosechados y se expresó en kilogramos por unidad experimental y, de manera descriptiva, en kilogramos por planta.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se calculó mediante la relación entre el rendimiento y el volumen total de agua utilizado, expresados respectivamente en kilogramos y metros cúbicos, de acuerdo con la siguiente expresión: $EUA = \text{rendimiento del cultivo (kg)} / \text{volumen de agua utilizado (m}^3\text{)}$. El porcentaje de ahorro de agua se calculó mediante la



diferencia entre el volumen utilizado por T1 y T2, dividida para el volumen utilizado por T1 y multiplicada por 100.

Los datos fueron organizados en una matriz y analizados mediante estadística descriptiva, utilizando medias y desviaciones estándar. La normalidad se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Cuando se cumplieron los supuestos paramétricos, se utilizó la prueba t de Student para muestras independientes; cuando no se cumplieron, se contempló la prueba U de Mann-Whitney. El nivel de significancia establecido fue $p < .05$.

Especificaciones técnicas y reproducibilidad del sistema IoT

Para facilitar la reproducibilidad, la descripción definitiva del experimento deberá incluir, sin excepción, los parámetros técnicos efectivamente utilizados durante los 120 días de evaluación. La información faltante debe recuperarse de las bitácoras del experimento, fichas técnicas de los equipos o registros de instalación antes de la presentación editorial final.

Debido a que cada tratamiento estuvo conformado por cuatro unidades experimentales, las unidades experimentales constituyeron la base de la comparación entre tratamientos. Las 30 plantas contenidas en cada unidad experimental no se consideraron como réplicas independientes para evitar pseudorreplicación.

Reconstrucción estadística de los contrastes reportados

Dado que la unidad experimental fue la réplica estadística y se utilizaron cuatro unidades por tratamiento, los contrastes entre tratamientos se realizaron con 6 grados de libertad. A partir de los valores p reportados en la versión fuente, los estadísticos t bilaterales correspondientes pueden expresarse aproximadamente como sigue. Estos valores son una reconstrucción matemática de los p-valores publicados, no sustituyen la salida original del software estadístico.

3. RESULTADOS

Consumo de agua y frecuencia de riego

Durante los 120 días de evaluación se observó una diferencia en el consumo hídrico entre los tratamientos. El tratamiento convencional (T1) registró un volumen acumulado promedio de 1.680 L por unidad experimental, mientras que el sistema automatizado mediante IoT (T2) utilizó 1.310 L. La diferencia fue de 370 L, equivalente a una reducción del 22,0 % del



volumen de agua utilizado. La frecuencia de riego también fue menor en T2, con un promedio de 74 eventos, frente a 96 eventos registrados en T1.

Tabla 1

Comparación del volumen de agua utilizado y la frecuencia de riego según tratamiento

Indicador	T1: Convencional	T2: IoT
Volumen total de agua (L)	1.680	1.310
Eventos de riego	96	74
Reducción del volumen de agua	—	22,0 %

Nota. T1 corresponde al tratamiento de riego convencional programado y T2 al tratamiento de riego automatizado mediante tecnología IoT. El porcentaje de reducción se calculó respecto del volumen utilizado por T1.

Interpretación

La Tabla 1 muestra que el tratamiento IoT utilizó 370 L menos por unidad experimental que el tratamiento convencional, lo que representa una reducción del 22,0 % del volumen de agua. Asimismo, el número de eventos de riego disminuyó en 22 eventos, equivalente a una reducción aproximada del 22,9 % de la frecuencia de riego. Las diferencias fueron estadísticamente significativas para el volumen total de agua utilizado ($p = .003$) y la frecuencia de riego ($p = .001$).

Humedad del suelo

El tratamiento automatizado presentó una humedad media del suelo de $26,7 \pm 2,3$ %, mientras que T1 presentó $25,8 \pm 4,1$ %. La diferencia entre tratamientos no fue estadísticamente significativa ($p = .318$). No obstante, la menor desviación estándar observada en T2 indica una menor variabilidad descriptiva de la humedad durante el periodo evaluado.

Rendimiento y eficiencia en el uso del agua

En T1, el rendimiento medio fue de 57,6 kg por unidad experimental, mientras que en T2 fue de 59,4 kg. El rendimiento por planta fue de 1,92 kg y 1,98 kg, respectivamente. La diferencia de rendimiento entre tratamientos fue de 1,8 kg por unidad experimental, equivalente a un incremento descriptivo de 3,1 % en T2; sin embargo, la diferencia no fue estadísticamente significativa ($p = .241$). La eficiencia en el uso del agua fue de 34,3 kg/m³ para T1 y 45,3 kg/m³ para T2, y esta diferencia fue estadísticamente significativa ($p = .004$).



Tabla 2

Comparación de la humedad del suelo, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua según tratamiento

Variable	T1: Convencional	T2: IoT
Humedad del suelo (%)	25,8 ± 4,1	26,7 ± 2,3
Rendimiento (kg/unidad)	57,6	59,4
Rendimiento (kg/planta)	1,92	1,98
Eficiencia del agua (kg/m ³)	34,3	45,3

Nota. Los valores corresponden a las medias obtenidas durante los 120 días de evaluación. La humedad del suelo se expresa como media ± desviación estándar; el rendimiento se expresa en kg por unidad experimental y por planta, y la eficiencia en el uso del agua en kg/m³. T1 = riego convencional programado; T2 = riego automatizado mediante IoT.

Interpretación

La Tabla 2 evidencia que T2 presentó una humedad media ligeramente superior y menor variabilidad, aunque la diferencia de humedad no fue estadísticamente significativa. El rendimiento también fue descriptivamente mayor en T2, pero sin diferencia estadísticamente significativa. En contraste, la eficiencia en el uso del agua fue superior en T2 y la diferencia fue estadísticamente significativa, lo que indica un mayor aprovechamiento del agua para producir una cantidad comparable de tomate.

Análisis estadístico

La prueba de Shapiro-Wilk indicó una distribución compatible con el supuesto de normalidad para las variables analizadas ($p > .05$). En consecuencia, la comparación mediante t de Student para muestras independientes mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en el volumen total de agua utilizado ($p = .003$) y en la frecuencia de riego ($p = .001$). Para la humedad promedio del suelo ($p = .318$) y el rendimiento ($p = .241$) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. La eficiencia en el uso del agua presentó una diferencia estadísticamente significativa a favor del tratamiento IoT ($p = .004$). En conjunto, los resultados indican que la automatización permitió reducir el consumo de agua y la frecuencia de riego, mejorar la eficiencia hídrica y mantener un rendimiento estadísticamente comparable al sistema convencional.

4. DISCUSIÓN



Los resultados obtenidos muestran que la automatización del riego mediante IoT permitió reducir el consumo de agua sin producir una disminución estadísticamente significativa del rendimiento. El tratamiento T2 utilizó 22.0 % menos agua que el tratamiento convencional y redujo el número de eventos de irrigación de 96 a 74 durante el periodo experimental. Este comportamiento es consistente con investigaciones que han señalado que los sistemas de riego basados en sensores permiten adaptar la aplicación de agua a las condiciones reales de humedad del suelo y reducir aplicaciones innecesarias (Datta & Taghvaeian, 2023; Vallejo-Gómez et al., 2023).

La ausencia de diferencias significativas en la humedad del suelo indica que la reducción del volumen aplicado no estuvo acompañada de una disminución importante de la disponibilidad hídrica en la zona radicular. El tratamiento IoT mantuvo una humedad promedio ligeramente superior a la del tratamiento convencional. Este resultado es relevante porque el objetivo de la automatización no consiste únicamente en reducir el volumen de agua, sino en mantener las condiciones de humedad dentro de un intervalo apropiado para el desarrollo del cultivo. El rendimiento obtenido en T2 fue ligeramente superior al registrado en T1; sin embargo, la diferencia no fue estadísticamente significativa. Por tanto, los resultados no permiten afirmar que la automatización haya incrementado significativamente la producción. Lo que sí se observa es que la reducción del suministro de agua no estuvo asociada con una disminución significativa del rendimiento. Investigaciones realizadas en tomate bajo invernadero han demostrado la importancia de establecer programas de riego basados en el balance hídrico del suelo y las necesidades del cultivo para mantener la productividad y mejorar el uso del agua (Zhang et al., 2023). En tomate bajo invernadero, la respuesta del rendimiento y de la productividad del agua también depende de la estrategia de riego y del nivel de disponibilidad hídrica, por lo que los resultados deben interpretarse en función de las condiciones específicas del manejo (Wu et al., 2021).

La eficiencia en el uso del agua presentó una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos. El valor obtenido en T2 fue de 45.3 kg/m³, frente a 34.3 kg/m³ en T1. Esta diferencia puede explicarse principalmente por la combinación de un menor volumen de agua aplicado y un rendimiento similar entre tratamientos. La literatura reciente sobre agricultura inteligente señala que la integración de sensores, conectividad y sistemas automatizados de



control constituye una estrategia para mejorar la gestión de los recursos hídricos en sistemas agrícolas intensivos (Mowla et al., 2023; Rajak et al., 2023; Prakash et al., 2023).

Los resultados también deben interpretarse considerando que la eficiencia de un sistema IoT depende de la adecuada calibración de los sensores, la ubicación de los puntos de medición, los umbrales establecidos y la capacidad del sistema de control para responder oportunamente a los cambios de humedad. Por ello, la reproducibilidad de este tipo de experimentos requiere reportar de manera detallada las características del hardware y software utilizado, así como los procedimientos de calibración y control.

Limitaciones del estudio

El estudio se desarrolló durante 120 días, con dos tratamientos, cuatro repeticiones por tratamiento y 30 plantas por unidad experimental, para un total de 240 plantas y ocho unidades experimentales. El sistema IoT permitió reducir el volumen de agua utilizado de 1.680 L en T1 a 1.310 L en T2, así como la frecuencia de riego de 96 a 74 eventos. Sin embargo, al haberse realizado el ensayo bajo las condiciones específicas de una sola finca y durante un único periodo experimental, la extrapolación de los resultados a otros sistemas productivos debe realizarse con precaución, debido a la posible influencia de las condiciones ambientales, las características del suelo y las necesidades hídricas del cultivo.

Otra limitación corresponde a la documentación técnica del sistema IoT, ya que no se dispone de información verificable sobre el modelo exacto de los sensores, procedimiento de calibración, número y ubicación de sensores, profundidad de instalación, umbrales específicos de activación y detención, controlador o plataforma utilizada y frecuencia de adquisición de datos. Asimismo, aunque se observaron diferencias significativas en el consumo de agua ($p = .003$), frecuencia de riego ($p = .001$) y eficiencia hídrica ($p = .004$), no se encontraron diferencias significativas en la humedad del suelo ($p = .318$) ni en el rendimiento ($p = .241$). Por tanto, los resultados permiten evidenciar principalmente una mejora en la eficiencia del uso del agua, pero no afirmar un incremento estadísticamente significativo del rendimiento del cultivo.

5. CONCLUSIÓN

La implementación de un sistema de riego automatizado mediante tecnología IoT mostró un comportamiento favorable para optimizar el uso del agua en el cultivo de tomate bajo



invernadero. El tratamiento automatizado (T2) utilizó 1.310 L de agua por unidad experimental durante los 120 días, frente a 1.680 L empleados por el tratamiento convencional (T1), lo que representó una reducción del 22,0 % del volumen utilizado. De manera complementaria, la frecuencia de riego disminuyó de 96 a 74 eventos, y ambas diferencias fueron estadísticamente significativas.

El tratamiento IoT presentó una humedad promedio de $26,7 \pm 2,3$ %, frente a $25,8 \pm 4,1$ % en el tratamiento convencional. Aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa ($p = .318$), la menor desviación estándar en T2 indica una menor variabilidad descriptiva de la humedad del suelo. Por ello, este resultado debe interpretarse como evidencia descriptiva y no como una diferencia estadísticamente demostrada.

En cuanto al rendimiento, T2 alcanzó 59,4 kg por unidad experimental frente a 57,6 kg en T1, equivalente a un incremento descriptivo de 3,1 %. Sin embargo, la diferencia no fue estadísticamente significativa ($p = .241$). En consecuencia, bajo las condiciones evaluadas, la reducción del volumen de agua no produjo una disminución estadísticamente significativa del rendimiento.

El resultado más relevante correspondió a la eficiencia en el uso del agua, que aumentó de $34,3 \text{ kg/m}^3$ en T1 a $45,3 \text{ kg/m}^3$ en T2, con una diferencia estadísticamente significativa ($p = .004$). En conjunto, los resultados indican que, bajo las condiciones del experimento, la automatización mediante IoT permitió reducir significativamente el consumo de agua y mejorar su eficiencia, manteniendo un rendimiento estadísticamente comparable con el sistema convencional. Esta interpretación es coherente con estudios que vinculan el manejo de la humedad del suelo y la programación del riego con mejoras en la productividad del agua en tomate (Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm>



- Bryant, C. J. (2023). Smart irrigation systems: A review of current technologies and applications. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 9(1), e20217. <https://doi.org/10.1002/cft2.20217>
- Colimba-Limaico, J. E., Zubelzu-Minguez, S., & Rodríguez-Sinobas, L. (2022). Optimal irrigation scheduling for greenhouse tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.) in Ecuador. *Agronomy*, 12(5), 1020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051020>
- Datta, S., & Taghvaeian, S. (2023). Soil water sensors for irrigation scheduling in the United States: A systematic review of literature. *Agricultural Water Management*, 278, 108148. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108148>
- Dhal, S., Wyatt, B. M., Mahanta, S., Bhattarai, N., Sharma, S., Rout, T., Saud, P., & Acharya, B. S. (2024). Internet of Things (IoT) in digital agriculture: An overview. *Agronomy Journal*, 116(3), 1144–1163. <https://doi.org/10.1002/agi2.21385>
- Flores Cayuela, C. M., González Perea, R., Camacho Poyato, E., & Montesinos, P. (2022). An ICT-based decision support system for precision irrigation management in outdoor orange and greenhouse tomato crops. *Agricultural Water Management*, 269, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107686>
- Liao, R., Zhang, S., Zhang, X., Wang, M., Wu, H., & Zhangzhong, L. (2021). Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept. *Agricultural Water Management*, 245, 106632. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106632>
- Morchid, A., El Alami, R., Raczah, A. A., & Sabbar, Y. (2024). Applications of Internet of Things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural sustainability: Benefits and challenges. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102509. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102509>
- Moustafa, A., Abdelwahab, O. M. M., Ricci, G. F., & Gentile, F. (2026). Internet of Things-enabled smart irrigation systems for precision water management: A systematic review. *Agricultural Water Management*, 333, 110615. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110615>
- Mowla, M. N., Mowla, N., Shah, A. F. M. 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://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299>



- Prakash, C., Chander, S., Singh, L. P., Gupta, A., & Lohan, S. K. (2023). Advancements in smart farming: A comprehensive review of IoT, wireless communication, sensors, and hardware for agricultural automation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 362, 114605. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114605>
- Rajak, P., Ganguly, A., Bhattacharya, S., & Seal, A. B. N. (2023). Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>
- Sharma, V., Kaur, G., Sreethu, S., Chhabra, V., & Kashyap, R. (2025). Smart irrigation systems in agriculture: An overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 239, 111008. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111008>
- Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, 13(2), 342. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Wu, Y., Yan, S., Fan, J., Zhang, F., Xiang, Y., Zheng, J., & Guo, J. (2021). Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation. *Scientia Horticulturae*, 275, 109710. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109710>
- Zhang, H., He, L., Di Gioia, F., Choi, D., Elia, A., & Heinemann, P. (2022). LoRaWAN based Internet of Things (IoT) system for precision irrigation in plasticulture fresh-market tomato. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100053>
- Zhang, J., Xiang, L., Zhu, C., Li, W., Jing, D., Zhang, L., Liu, Y., Li, T., & Li, J. (2023). Evaluating the irrigation schedules of greenhouse tomato by simulating soil water balance under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 283, 108323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108323>

CONFLICTO DE INTERESES

No existe.

FINANCIAMIENTO

No aplica.



CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Mayra Gabriela Naspud Espinoza, María Magdalena Delgado Cabanilla.

Metodología: Mayra Gabriela Naspud Espinoza, María Sol Chevez Villanueva, Carlos Fernando Plaza Calle.

Investigación: Mayra Gabriela Naspud Espinoza, María Magdalena Delgado Cabanilla, María Sol Chevez Villanueva, Carlos Fernando Plaza Calle, Karen Dennys Pineda Mora.

Redacción – borrador original: Mayra Gabriela Naspud Espinoza, María Sol Chevez Villanueva, Karen Dennys Pineda Mora.

Redacción – revisión y edición: Mayra Gabriela Naspud Espinoza, María Magdalena Delgado Cabanilla, Carlos Fernando Plaza Calle, Karen Dennys Pineda Mora.

