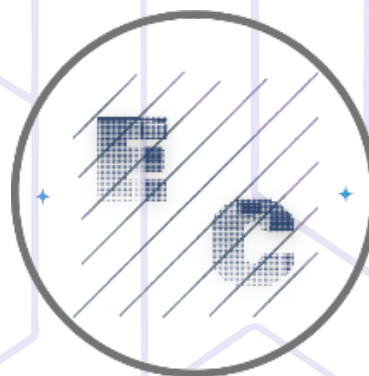
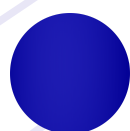
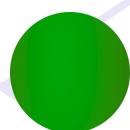




REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS



Universidad de Sonsonate



Volumen 3, Número 3



Julio - Septiembre, 2026
Edición Especial

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3
Julio-Septiembre 2026
Edición Especial

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

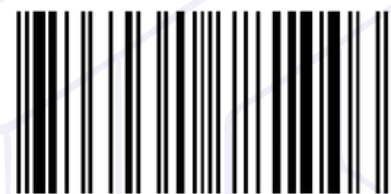
Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.



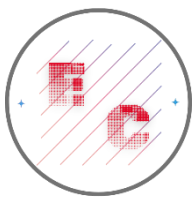
Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 3, julio-septiembre 2026, edición especial, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 julio 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Vol. 3, Núm. 3, 2026, julio-septiembre, Edición Especial

DOI: <https://doi.org/10.71112/vnkpxf44>

**SISTEMAS INTEGRADOS DE GESTIÓN AUTÓNOMA DE INVERNADEROS PARA
OPTIMIZAR RECURSOS HÍDRICOS**

**INTEGRATED AUTONOMOUS GREENHOUSE MANAGEMENT SYSTEMS TO
OPTIMIZE WATER RESOURCES**

Diego Antonio Valle Hernández

El Salvador

Sistemas integrados de gestión autónoma de invernaderos para optimizar recursos hídricos

Integrated autonomous greenhouse management systems to optimize water resources

Diego Antonio Valle Hernández^{a,*}

diego.valle@usonsonate.edu.sv

<https://orcid.org/0009-0004-4638-975X>

*Autor de correspondencia: diego.valle@usonsonate.edu.sv, ^aUniversidad de Sonsonate, El Salvador

RESUMEN

La escasez hídrica y el cambio climático impulsan la innovación de sistemas agrícolas más eficientes. Los invernaderos con gestión autónoma representan una alternativa tecnológica prometedora para optimizar el uso del agua. Esta revisión analiza componentes tecnológicos, metodologías y resultados de sistemas automatizados de riego que integran sensores, algoritmos inteligentes y sistemas de soporte a decisiones. Los resultados muestran reducciones del 30-45% en consumo de agua manteniendo o aumentando la productividad. Tecnologías IoT, inteligencia artificial y modelado predictivo son elementos clave para la automatización eficiente. Sin embargo, persisten desafíos: altos costos de implementación, necesidad de formación técnica para calibración de sensores y adaptación a condiciones ambientales locales. Esta revisión proporciona una recopilación actualizada del estado del arte y direcciones futuras para la investigación en gestión autónoma de recursos hídricos en agricultura protegida.

Palabras clave: agricultura de precisión; riego automatizado; sensores IoT; eficiencia hídrica; invernaderos inteligentes.

ABSTRACT

Water scarcity and climate change drive innovation for more efficient agricultural systems. Greenhouses with autonomous management represent a promising technological alternative to optimize water use. This review analyzes technological components, methodologies and results of automated irrigation systems that integrate sensors, intelligent algorithms and decision support systems. The results show reductions of 30-45% in water consumption while maintaining or increasing productivity. IoT technologies, artificial intelligence and predictive modeling are key elements for efficient automation. However, challenges remain: high implementation costs, need for technical training for sensor calibration and adaptation to local environmental conditions. This review provides an updated compilation of the state of the art and future directions for research in autonomous water resource management in protected agriculture.

Keywords: precision agricultura; automated irrigation; IoT sensors; water efficiency; smart greenhouses.

Recibido: 13 mayo 2026 | Aceptado: 30 junio 2026 | Publicado: 1 julio 2026

INTRODUCCIÓN

La agricultura en la actualidad enfrenta grandes desafíos para producir mayor cantidad de alimentos con menos recursos en un contexto de creciente presión hídrica. Según estimaciones recientes, el sector productivo agrícola consume aproximadamente el 70% del agua dulce disponible a nivel mundial, mientras que el cambio climático intensifica la

variabilidad de las precipitaciones y la disponibilidad de recursos hídricos (Garcia & Gonzales, 2022, pág. 80). En este contexto, la agricultura protegida bajo invernadero se presenta como una alternativa viable para optimizar el uso del agua, permitiendo un control más preciso de las variables ambientales y reduciendo las pérdidas por evaporación y percolación.

Los invernaderos tradicionales, aunque más eficientes que los cultivos tradicionales a campo abierto, aún presentan márgenes significativos de mejora en la gestión de recursos hídricos. La implementación de sistemas de riego tecnificado y semi-tecnificado frecuentemente resulta en exceso de riego, lixiviación de nutrientes y desperdicio de agua, con eficiencias de uso del agua que raramente superan el 60% (García, Bautista, & Reyes, 2023). Esta situación se agrava gradualmente en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad hídrica constituye el principal factor limitante para la producción agrícola.

Los sistemas integrados de gestión autónoma se fundamentan en la adquisición continua y precisa de variables edafoclimáticas. La literatura reciente identifica tres categorías principales de sensores implementados en invernaderos inteligentes (Berrios & Rivera, 2022, pág. 3).

Sensores de suelo: Los sensores de contenido volumétrico de agua (VWC) basados en capacitancia o reflectometría en dominio de tiempo (TDR) constituyen la base para la determinación del estado hídrico del sustrato. Estudios recientes han demostrado que la instalación de sensores a múltiples profundidades (10, 20 y 30 cm) permite caracterizar el perfil de humedad y optimizar la programación del riego por etapas fenológicas (Moreno Perdomo, 2023, pág. 4).

Sensores ambientales: La monitorización del microclima incluye temperatura, humedad relativa, radiación fotosintéticamente activa (PAR), déficit de presión de vapor (DPV) y concentración de CO₂. La integración de estaciones meteorológicas dentro del invernadero, combinada con datos externos, permite estimar la demanda evapotranspirativa con mayor

precisión que los métodos tradicionales basados únicamente en datos climáticos externos (Ramos , Quej, Carrillo, Aceves, & Rivera, 2021, pág. 39). Los sensores de temperatura infrarroja no invasivos han ganado relevancia para la estimación del índice de estrés hídrico del cultivo, permitiendo ajustes dinámicos del riego basados en el estado fisiológico real de las plantas.

Plataformas de comunicación y almacenamiento

La integración de arquitectura IoT predominante en invernaderos inteligentes emplea protocolos de comunicación inalámbrica de bajo consumo energético. Los estudios consultados reportan el uso de tecnologías para transmisión a larga distancia con mínimo consumo, ZigBee para redes de área local con múltiples nodos sensores, y WiFi o conectividad celular (4G/5G) para la comunicación con servidores en la nube (Peña & Ibarra, 2024)

Algoritmos de control y toma de decisiones

La evolución de los sistemas de control en invernaderos tenido mejoras desde controladores simples tipo ON/OFF hasta sistemas adaptativos basados en inteligencia artificial. La revisión identifica cuatro paradigmas principales de control:

Control basado en umbrales: El método más tradicional establece valores umbral para parámetros de suelo (e.g., humedad volumétrica < 25%) o planta (e.g., potencial hídrico < -0.5 MPa) que activan el riego. Aunque simple y robusto, este enfoque no considera la dinámica temporal ni las interacciones entre variables (Flores , Sánchez P, & Sánchez , 2020, pág. 369).

Aprendizaje automático y redes neuronales: Los algoritmos de machine learning (ML) y deep learning (DL) aprenden patrones complejos de los datos históricos sin necesidad de modelado explícito. Las redes neuronales recurrentes han mostrado precisión superior en la predicción de necesidades hídricas considerando secuencias temporales (Garcia, Soto, Toledano, Rivas, & Gastélum, 2020, pág. 9). Estudios pioneros reportan que agentes de aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) pueden superar a estrategias de control

convencionales, logrando simultáneamente máxima eficiencia en uso del agua y calidad de fruto (Xing & Wang, 2024, págs. 2-3).

Estrategias de riego de precisión en invernaderos

El riego deficitario controlado (RDC) busca maximizar la eficiencia en el uso del agua aplicando un estrés hídrico moderado en etapas fenológicas específicas sin comprometer significativamente el rendimiento. La automatización del RDC mediante sistemas inteligentes permite una implementación más precisa que los métodos manuales tradicionales (Tobar, Pinto, & Medina, 2025).

Investigaciones en tomate bajo invernadero han demostrado que la aplicación automatizada de RDC durante la fase de maduración de frutos, reduciendo el riego al 70-80% de la evapotranspiración del cultivo (ETc), incrementa los sólidos solubles totales y licopeno sin reducción significativa en el rendimiento comercial, resultando en un ahorro de agua del 25-35% (Arregocés, Restrepo, Usme, Montoya, & Bedoya, 2023). La clave del éxito radica en la monitorización continua del estado hídrico mediante sensores de planta que ajustan dinámicamente los coeficientes de riego según la respuesta fisiológica observada.

Fertirrigación automatizada de precisión

La integración de la nutrición con el manejo hídrico mediante fertirrigación automatizada representa un avance significativo en la optimización de recursos. Los sistemas avanzados ajustan no solo el volumen de agua sino también la concentración y proporción de nutrientes en función del análisis en tiempo real de solución drenante y contenido de nutrientes en sustrato (Morales, Ruiz, & Alejo, 2020).

Sensores de conductividad eléctrica (CE) y pH instalados en líneas de drenaje permiten cerrar el ciclo de retroalimentación, ajustando automáticamente las soluciones nutritivas para mantener valores óptimos en la zona radicular. Estudios en cultivos hidropónicos de lechuga bajo invernadero muestran que sistemas de fertirrigación de ciclo cerrado reducen el consumo

de agua y fertilizantes en un 40-50% respecto a sistemas abiertos, mientras mejoran la uniformidad de crecimiento y reducen la lixiviación de nitratos (Aguilar, Cardenas, & Rodríguez, 2023).

Integración de modelado predictivo y pronósticos

La estimación precisa de la demanda evapotranspirativa constituye el fundamento de cualquier estrategia de riego eficiente. Los sistemas integrados más avanzados incorporan modelos de balance hídrico que calculan la ETc en tiempo real considerando variables microclimáticas del invernadero y características específicas del cultivo (Barron, Ramírez, Vásquez, & Quevedo, 2020).

Integración de pronósticos meteorológicos

La incorporación de pronósticos meteorológicos en los algoritmos de decisión representa un salto cualitativo desde sistemas reactivos hacia sistemas proactivos. El acceso a pronósticos horarios de radiación, temperatura y precipitación permite anticipar la evapotranspiración futura y optimizar el calendario de riegos (Bermeo, Bazán, & Guevara, 2022).

La incertidumbre inherente a los pronósticos meteorológicos se maneja mediante enfoques probabilísticos y optimización robusta. Algoritmos que consideran múltiples escenarios meteorológicos y minimizan el riesgo de déficit hídrico bajo incertidumbre han mostrado ser superiores a estrategias determinísticas, especialmente durante períodos de transición estacional con alta variabilidad climática (Fernández-Pacheco et al., 2023).

METODOLOGÍA

Para desarrollar este artículo se utilizó la metodología de revisión documental centrado en la planificación rigurosa y la ejecución sistemática de la búsqueda, análisis e interpretación de información ya existente sobre el tema. Inicialmente se establecieron los criterios de

exclusión e inclusión de los documentos; luego se realizó la búsqueda de forma multifuente (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014), utilizando gestores de información académica clave, consultando plataformas como ResearchGate, Google Academics y Mendeley para identificar artículos y libros relevantes, aprovechando las funciones de filtrado avanzado y seguimiento de citas de cada herramienta. Además, se utilizó inteligencia artificial como herramienta de apoyo para generar ideas, refinar términos de búsqueda o conceptos clave que pudieron no haber surgido en las búsquedas iniciales, validando siempre con las fuentes primarias académicas.

Se consultaron 150 artículos científicos relacionados con agricultura de precisión, riego automatizado, sensores IoT, eficiencia hídrica e invernaderos inteligentes. A partir de este corpus documental preliminar, se aplicaron los criterios temáticos previamente establecidos mediante la revisión de resúmenes y, en algunos casos, del texto completo para realizar la selección final de los documentos. Posteriormente, se llevó a cabo una lectura crítica profunda que permitió sintetizar la información y organizar el material en categorías temáticas. Finalmente, sobre la base de esa síntesis narrativa que contrasta las diversas perspectivas y aporta una interpretación original, este artículo establece el estado del arte del tema y sugiere futuras líneas de investigación.

RESULTADOS

Eficiencia hídrica y productividad

El análisis cuantitativo de los estudios revisados revela que los sistemas integrados de gestión autónoma pueden reducir el consumo de agua entre 25% y 45% respecto a manejo convencional, con la magnitud del ahorro dependiendo del nivel de automatización previo y las características del cultivo.

Las investigaciones también han demostrado que un riego adecuado no solo mejora la eficiencia del uso del agua, sino que también conduce a la mejora del bienestar y la producción de los cultivos (Calderon, Centella, Samaniego, & Collado, 2021).

Estudios en tomate de crecimiento indeterminado bajo invernadero en clima mediterráneo reportan ahorros consistentes del 30-40% cuando se comparan sistemas autónomos basados en sensores de suelo y planta versus programación de riego basada en ETc calculada con Kc tabulados (Kreutler, Ruíz, & Chañag, 2024, pág. 2). En cultivos de ciclo corto como lechuga y espinaca, los ahorros tienden a ser menores (20-30%) debido a la ya elevada eficiencia de los sistemas hidropónicos convencionales, pero aún significativos en términos de sostenibilidad del recurso (Puelles Bulnes, 2023).

Los mayores ahorros absolutos se documentan en la transición desde sistemas manuales o semi-automatizados hacia sistemas completamente autónomos con múltiples sensores y control inteligente. Un estudio comparativo en invernaderos comerciales de pimiento en el sureste español encontró reducciones del 42% en consumo de agua manteniendo rendimientos comerciales superiores al 95% del testigo con riego convencional (Ramírez, Palau, León, & Suarez, 2021). Los autores atribuyen este resultado a la eliminación de riegos excesivos precautorios y la respuesta precisa a la variabilidad espacial dentro del invernadero mediante zonas de riego diferenciadas.

Impacto en productividad y calidad

Contrariamente a preocupaciones iniciales sobre posibles compromisos entre ahorro de agua y productividad, la evidencia revisada indica que los sistemas de gestión autónoma frecuentemente mantienen o incluso incrementan el rendimiento comercial respecto a sistemas convencionales (Arregoces, Restrepo, Usme, Montoya, & Branch, 2023). Este resultado aparentemente paradójico se explica por dos mecanismos principales:

- Eliminación de estrés hídrico no intencional: el monitoreo continuo previene tanto déficits como excesos hídricos que afectan negativamente el crecimiento. Estudios en pepino evidencian que fluctuaciones en el contenido de humedad del sustrato superiores al 10% del volumen reducen la tasa fotosintética neta en 15-25%, pérdida que se evita con control automatizado de alta precisión (Valverde & Arias , 2020).
- Optimización del ambiente radicular: la fertirrigación automatizada mantiene condiciones óptimas de oxigenación, pH y CE en la zona radicular, factores que frecuentemente son subóptimos en manejo manual. Investigaciones demuestran que el mantenimiento automatizado de CE en el rango objetivo (2.0-2.5 dS/m para tomate) mediante ajuste dinámico de la concentración de la solución nutritiva incrementa la eficiencia fotosintética y particionamiento de fotosintatos hacia frutos en 10-15% (Moreno, Pineda, Colinas, & Sahagún, 2020).

Desafíos tecnológicos y limitaciones actuales

La precisión y confiabilidad de los sistemas autónomos depende críticamente de la calidad de los datos sensoriales. La calibración de sensores de humedad de suelo representa un desafío persistente, especialmente en sustratos heterogéneos o cuando se emplean enmiendas orgánicas que alteran las propiedades dieléctricas del medio (Arregocés, Restrepo, Usme, Montoya, & Bedoya, 2023). Estudios de validación demuestran que sensores capacitivos comerciales pueden presentar desviaciones del 15-25% respecto a mediciones gravimétricas sin calibración específica para el sustrato utilizado.

La deriva temporal de sensores constituye otra limitación significativa. Sensores de CE y pH en contacto con soluciones nutritivas experimentan incrustaciones y biofouling que degradan su precisión, requiriendo limpieza y recalibración cada 4-8 semanas. (Puelles, 2023). Los sensores ópticos para monitorización de planta enfrentan desafíos relacionados con

suciedad en lentes, variabilidad de iluminación y oclusión por follaje denso, factores que pueden comprometer la calidad de las mediciones.

Estrategias emergentes para abordar estos desafíos incluyen: (1) algoritmos de detección de fallos sensoriales mediante análisis de coherencia entre múltiples sensores redundantes, (2) autocalibración mediante comparación con modelos físicos de referencia, (3) mantenimiento predictivo basado en patrones de deriva histórica, y (4) empleo de sensores virtuales que infieren variables difíciles de medir mediante modelos calibrados con datos de sensores más robustos (Aguilar-González, Cardenas-Juarez, & Rodríguez-Ortiz, 2021).

Variabilidad y adaptación a condiciones locales

Los algoritmos de control entrenados o calibrados en condiciones experimentales específicas frecuentemente muestran desempeño degradado cuando se implementan en invernaderos con características diferentes. La transferencia de modelos predictivos entre sitios (model transfer) enfrenta el desafío de la distribución no estacionaria de datos debido a variaciones en clima, genotipos cultivados, prácticas de manejo y características físicas del invernadero (Arregoces, Restrepo, Usme, Montoya, & Branch, 2023)

La variabilidad intra-invernadero también representa un desafío. Gradientes de temperatura, humedad y radiación dentro del invernadero, especialmente en estructuras de gran escala (> 1 ha), implican que condiciones microclimáticas y demandas hídricas no son uniformes espacialmente. Sistemas avanzados implementan zonas de control diferenciadas con sensórica y actuación independiente, pero esto incrementa significativamente la complejidad y costo del sistema (Aguilar-González, Cardenas-Juarez, & Rodríguez-Ortiz, 2021).

Economía circular y sistemas de ciclo cerrado

La convergencia de gestión hídrica automatizada con principios de economía circular está motivando el desarrollo de sistemas de invernadero completamente cerrados que recirculan el 100% del drenaje. Tecnologías de tratamiento avanzado (filtración, desinfección UV, ósmosis inversa) integradas con sistemas de control inteligente que ajustan dinámicamente la composición de soluciones nutritivas basándose en análisis continuos pueden eliminar virtualmente las descargas al ambiente (De Pascale et al., 2023).

Sistemas de captura y uso de agua atmosférica mediante deshumidificadores inteligentes que operan sincronizadamente con la gestión del clima del invernadero están siendo desarrollados para maximizar la autosuficiencia hídrica. Investigaciones pioneras demuestran que, en climas húmedos, la captura de agua de transpiración puede recuperar 30-50% del agua aplicada, cerrando parcialmente el ciclo hidrológico dentro del invernadero (Marrero, Gonzáles, León , & Suares , 2021).

La integración de fuentes alternativas de agua (aguas residuales tratadas, agua de lluvia, agua salobre desalinizada) con sistemas de monitoreo y tratamiento automatizados expandirá las opciones para agricultura en regiones con escasez hídrica severa. Plataformas de gestión que optimizan el blend de múltiples fuentes de agua según calidad, costo y disponibilidad representan una frontera prometedora de investigación (Mendoza, y otros, 2021).

DISCUSIÓN

Los sistemas integrados de gestión autónoma de riego en sistemas de invernaderos logran optimizar el recurso hídrico mientras mantienen o incrementan la productividad, contradiciendo la idea tradicional de un compromiso inevitable entre conservación del recurso y producción agrícola. Esto permite que se destaquen algunas ventajas de los sistemas autónomos, tal como la superioridad sobre métodos convencionales, manifestado porque los

sensores de suelo y planta superan las estimaciones basadas en coeficientes tabulados porque capturan la heterogeneidad espaciotemporal real del cultivo; además de que los mayores ahorros (30-40%) se observan en tomate; menores (20-30%) en cultivos hidropónicos de ciclo corto que ya son eficientes. Otra ventaja se presenta en los mecanismos de mejora productiva a través de la prevención de fluctuaciones hídricas que reducen la fotosíntesis en 15-25%, el mantenimiento óptimo de nutrientes que incrementa la eficiencia fotosintética en eliminación de riegos excesivos que generan un ahorro significativo.

Destaca también el desarrollo en avances tecnológicos al integrar Inteligencia artificial, redes neuronales recurrentes para predecir mejor las necesidades hídricas; y, además, la integración de estrategias agronómicas como la fertirrigación de ciclo cerrado que reduce agua, fertilizantes y disminuye la contaminación por nitratos, o bien, el riego deficitario controlado automatizado que ahorra agua mientras mejora la calidad del fruto.

Todo ello, evidencia algunos desafíos persistentes, tales como:

- Los sensores comerciales pueden tener desviaciones sin calibración específica.
- Requieren mantenimiento constante por incrustaciones.
- Los algoritmos entrenados en condiciones específicas pierden eficacia al transferirse a otros invernaderos.
- Inversión inicial elevada y requerimientos de capacitación técnica.
- En regiones con agua subvalorada económicamente, los incentivos son insuficientes.
- Brecha significativa entre potencial técnico y adopción comercial generalizada.

Sin embargo, a futuro se pueden vislumbrar algunas perspectivas que conducen a la economía circular, a través de sistemas de ciclo cerrado que recirculan el 100% del drenaje, la captura de agua de transpiración que recupera 30-50% del agua aplicada, y finalmente la

integración de fuentes alternativas (aguas residuales tratadas, lluvia, agua salobre desalinizada).

CONCLUSIONES

La revisión de literatura científica evidencia que los sistemas integrados de gestión autónoma de invernaderos representan una solución tecnológica madura y efectiva para la optimización de recursos hídricos en agricultura protegida. Los avances en sensórica, conectividad IoT, algoritmos de control inteligente y modelado predictivo han convergido para crear plataformas que reducen el consumo de agua.

Los componentes tecnológicos que integran mediciones de suelo, ambiente y planta para caracterizar comprehensivamente el estado hídrico, plataformas de comunicación inalámbrica y computación en la nube que permiten procesamiento de grandes volúmenes de datos y acceso remoto, algoritmos de control que evolucionan desde estrategias reactivas basadas en umbrales hacia sistemas predictivos y adaptativos.

Las estrategias de riego de precisión implementadas mediante automatización, incluyendo riego deficitario controlado, fertirrigación de ciclo cerrado y riegos de alta frecuencia, han demostrado no solo reducir el consumo de agua sino mejorar la eficiencia fotosintética, la nutrición vegetal y los parámetros de calidad del producto cosechado.

Los desafíos tecnológicos persistentes incluyen la calibración y mantenimiento de sensores, la complejidad de parametrización de algoritmos de control, limitaciones de conectividad, y la necesidad de adaptación de sistemas a condiciones locales específicas. La variabilidad espacial y temporal dentro de invernaderos, junto con las diferencias entre sitios, demanda desarrollar sistemas más robustos y adaptativos que puedan operar efectivamente en condiciones heterogéneas sin calibración intensiva.

La transición hacia sistemas de producción agrícola que operan bajo principios de economía circular, reciclando nutrientes y agua, representará la culminación de décadas de desarrollo tecnológico en automatización de invernaderos. La integración con fuentes alternativas de agua, tecnologías de tratamiento avanzado y sistemas de captura de agua atmosférica permitirá agricultura intensiva incluso en regiones con escasez hídrica severa.

Declaración de conflicto de interés

El autor declara no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación.

Declaración de contribución a la autoría

Diego Antonio Valle Hernández: conceptualización, redacción del borrador original.

Declaración de uso de inteligencia artificial

El autor declara que se utilizó la inteligencia artificial como apoyo para este artículo, y también que esta herramienta no sustituye de ninguna manera la tarea o proceso intelectual. Después de rigurosas revisiones con diferentes herramientas en la que se comprobó que no existe plagio como constan en las evidencias, los autores manifiestan y reconocen que este trabajo fue producto de un trabajo intelectual propio, que no ha sido escrito ni publicado en ninguna plataforma electrónica o de IA.

REFERENCIAS

- Aguilar, C., Flores, J., y Urrieta, J. (2023). Análisis térmico de invernaderos para reconversión de cultivos en la región cálida de Michoacán. doi:10.24850/j-tyca-14-05-04
- Aguilar, R., Cardenas, M., y Rodríguez, J. (2023). Monitoreo de Temperatura Mediante Red de Sensores para Mejorar el Uso del Agua en la Agricultura. doi:10.28940/terra.v41i0.1626

- Aguilar-González, R., Cardenas-Juarez, M., y Rodríguez-Ortiz, J. (2021). Monitoreo de Temperatura Mediante Red de Sensores para Mejorar el Uso del Agua en la Agricultura. doi:10.28940/terra.v41i0.1626
- Arregocés, P., Restrepo, J., Usme, M., Montoya, J., y Bedoya, J. (2023). Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0. doi: 10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853
- Arregoces, P., Restrepo, J., Usme, M., Montoya, J., y Branch, J. (2023). Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0. doi: 10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853
- Barron, M., Ramírez, R., Vásquez, M., y Quevedo, A. (2020). Calibración y evaluación de modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en invernaderos. doi:10.29312/remexca.v11i1.1906
- Bermeo, O., Bazán, W., y Guevara, V. (2022). Big Data en la predicción meteorológica para cultivos. doi: <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i16.148>
- Berrios, S., y Rivera, H. (2022). SISTEMA IoT BASADO EN ESP32 PARA EL CONTROL Y MONITOREO DE CULTIVOS EN INVERNADERO CON ENFOQUE DE AGRICULTURA 4.0. doi: doi.org/10.47796/ing.v4i0.624
- Calderon, S., Centella, M., Samaniego, M., y Collado, E. (2021). Sistema de riego basado en controlador PID para la adecuación de la humedad del suelo en invernaderos. doi:10.33412/rev-ric.v7.1.3041
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2021). *Economía circular en América Latina y el Caribe*. ONU (Organización de las Naciones Unidas). Obtenido de CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe): <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5fceda72-3fed-4ace-bb87-5688547cf2f5/content>
- Chango, R., y Llenez, R. (2021). *SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y CONTROL PARA AGUA DEL INVERNADERO N° 2 DEL CAMPUS SALACHE*. (T. d.

- grado, Ed.) Universidad de Cotopaxi. Obtenido de
<https://repoadmin.utc.edu.ec/items/0060c15f-ed6b-4257-98e5-b2dbfe4a1cec>
- Collado, E. S. (2021). Sistema de riego basado en controlador PID para la adecuación de la humedad del suelo en invernaderos. doi: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.1.3041>
- Ellen Mcarthur Foundation. (2021). *Economía circular en las ciudades: Hojas informativas sobre oportunidades y beneficios*. Obtenido de Ellen Mcarthur Foundation:
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-opportunity-and-benefit-factsheets>
- Flores, D., Sánchez P, L., y Sánchez , L. (2020). Modelo de estimación regional de la humedad del suelo para determinar las demandas de riego. doi:10.13053/CyS-24-1-3231
- Fundación Ellen MacArthur. (2019). *Completando el panorama: Cómo la economía circular aborda el cambio climático*. Obtenido de
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>
- Gamarra, A., Taipe, J., y Arellano, M. (2022). Sistema de monitoreo inteligente para controlar los factores ambientales de un invernadero en la reion de Junín. doi:
10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2020.17.1381
- Garcia, A., Soto, G., Toledano, M., Rivas, E., y Gastélum, A. (2020). Aplicaciones de las redes neuronales artificiales en la tecnología de invernaderos y visión general para el desarrollo de la agricultura inteligente. doi:10.3390/app10113835
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Intergovernmental Panel on Climate Changen (IPCC). (s/f). *Cambio Climático 2021: Las Bases de la Ciencia Física*. World Health Organitation. Obtenido de
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

- Kreutler, H., Ruíz, H., y Chañag, H. (2024). Influencia del coeficiente de cultivo (Kc) en la fenología y rendimiento del cultivo de tomate en invernadero. doi:10.31910/rudca.v27.n1.2024.2375
- Luis Eduardo Garcia Rodríguez, L. G. (2022). Uso de la tecnología convencional para la reducción de agua de consumo y gases de efecto invernadero a través de la recirculación del agua residual no doméstica: Piloto Industrial en Colombia. Economía Circular. doi: <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n2-2022007>
- Marrero, S., Gonzáles, I., León, M., y Suares, R. (2021). Control de humedad y consumo de agua en un invernadero. doi:10.47460/uct.v25i109.449
- Mendoza, M., Cervantes, M., Valenzuela, A., Guzmán, T., Orona, I., y Cervantes, T. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. doi:10.29312/remexca.v12i1.2789
- Morales, R., Ruiz, G., y Alejo, S. (2020). Impacto de automatización de riego: Caso de estudio. doi:10.13053/CyS-24-2-3412
- Moreno Perdomo, É. J. (2023). Sistema Inteligente de automatización, monitoreo y control de invernaderos mediante uso de IoT y el microcontrolador ESP-32 con aplicación de aprendizaje automático. doi:10.26507/paper.2818
- Moreno, M., Pineda, J., Colinas, M., y Sahagún, J. (2020). El oxígeno en la zona radical y su efecto en las plantas. doi:10.29312/remexca.v11i4.2128
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). *Desechos de la atención en salud*. OMS. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>
- Ortiz Rocha, G. A. (2022). Análisis sobre la actividad científica referente a las estrategias de climatización pasiva usada en invernaderos: Parte 1: Análisis bibliométrico. doi:10.37811/cl_rcm.v6i5.3419

- Peña, F., y Ibarra, F. (2024). Implementación de tecnologías IoT para la reducción del consumo energético. doi:10.37636/recit. v7n3e332
- Puelles Bulnes, M. E. (2023). Prototipo de un Invernadero automatizado hidropónico NFT con dos microclimas para el hogar basado en Internet de las cosas. doi:10.15381/risi. v16i1.25581
- Puelles, M. (2023). Prototipo de un Invernadero automatizado hidropónico NFT con dos microclimas para el hogar basado en Internet de las cosas. doi:10.15381/risi. v16i1.25581
- Quintanilla, K., González, C., y Valle, R. (2020). APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO UN APOORTE AL CUMPLIMIENTO DE LOS ODS EN ELSALVADOR, PERÍODO 2010-2020. Universidad de El Salvador. Obtenido de <https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/1d26c9ef-e5f8-4164-8c09-08c318005a30/content>
- Ramírez, S., Palau, I., León, M., y Suarez, R. (2021). Control de humedad y consumo de agua en un invernadero. doi:10.47460/uct. v25i109.449
- Ramos, L., Quej, V., Carrillo, E., Aceves, E., y Rivera, B. (2021). Estimación de la evapotranspiración de referencia con datos de temperatura: una comparación entre técnicas de cálculo convencionales y de inteligencia artificial en una región cálida-subhúmeda. doi:10.24850/j-tyca-2021-03-02
- Sagastume, A., Méndez, R., Campos, L., y Sanchez, T. (2021). *Educación Ambiental para Promover las 3R*. Universidad Dr. José Matías Delgado. Obtenido de https://www.academia.edu/49352833/Environmental_education_to_promote_3Rs_in_the_urban_area_of_the_municipality_of_Nuevo_Cuscatlan_La_Libertad_El_Salvador#loswp-work-container

- Sturzenegger, G., y Espinola, N. (2023). Apoyando el reciclaje inclusivo en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Obtenido de <https://blogs.iadb.org/agua/es/apoyando-el-reciclaje-inclusivo-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Tobar, B., Pinto, A., y Medina, A. (2025). Revisión sistemática de sistemas de control y monitoreo en riego para optimizar la eficiencia del agua en cultivos agrícolas: Propuesta integrada de mejora. doi:10.23857/pc. v10i8.10185
- Valverde, J., y Arias, D. (2020). Efectos del estrés hídrico en crecimiento y desarrollo fisiológico de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. doi:10.14483/2256201X.14786
- Xing, Y., y Wang, X. (2024). Aplicación precisa de agua y fertilizantes a los cultivos: desafíos y oportunidades. doi:10.3389/fpls.2024.1444560