CIENCIA INTERDISCIPLINARIA INTERNACIONAL

ISSN: 3121-2948

Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

DOI: https://doi.org/10.70577/cieninter.v4i4.152

Optimización del riego inteligente mediante estaciones meteorológicas de bajo costo y sensores de suelo: una revisión sistemática

Optimization of smart irrigation using low-cost weather stations and soil sensors: A systematic review

Marcelo Agustín Benavides Rentería[1]
Universidad Agraria del Ecuador
marcelo.benavides.renteria@uagraria.edu.ec
https://orcid.org/0009-0008-1162-3605

Amado Diego Maruri Morán[2]
Universidad Agraria del Ecuador
amaruri@uagraria.edu.ec
https://orcid.org/0009-0006-0903-5973

Cómo citar

Benavides Rentería, M. A., & Maruri Morán, A. D. (2026). Optimización del riego inteligente mediante estaciones meteorológicas de bajo costo y sensores de suelo: una revisión sistemática. *Ciencia Interdisciplinaria Internacional*, *4*(4), 82–107. https://doi.org/10.70577/cieninter.v4i4.152

Fecha de recepción: 2026-10-07

Fecha de aceptación: 2026-10-21

Fecha de publicación: 2026-11-04

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

RESUMEN

Contexto: El uso ineficiente del agua en la agricultura constituye uno de los principales desafíos para la sostenibilidad y la seguridad alimentaria. En este escenario, los sistemas de riego inteligente basados en estaciones meteorológicas de bajo costo se perfilan como una alternativa accesible dentro de la agricultura de precisión. Objetivo: Analizar sistemáticamente la literatura científica publicada entre 2019 y 2025 sobre sistemas de riego automatizado que integran estaciones meteorológicas de bajo costo. Métodos: Se aplicó la metodología PRISMA 2020 en las bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO, obteniéndose una muestra final de 40 estudios publicados en inglés y español. Resultados: La mayoría de las investigaciones incorporó tecnolo-gías IoT, sensores de humedad del suelo y modelos de programación del riego basados en evapotranspiración. Los estudios reportaron ahorros de agua de entre 30 % y 50 %, además de una disminución de los costos operativos y una mayor capacidad de monitoreo remoto mediante plataformas de hard-ware abierto como Arduino y ESP32. Sin embargo, varios trabajos señalaron limitaciones relacionadas con la calibración de sensores de bajo costo, la estabilidad de las mediciones y la conectividad en zonas rurales. Estos resultados indican que el desempeño de los sistemas depende no solo de la auto-matización, sino también de la calidad de los datos climáticos y del contexto de implementación. Conclusiones: La evidencia revisada muestra que las estaciones meteorológicas de bajo costo representan una solución técnicamente viable y económicamente accesible para optimizar el riego, especialmente en explotaciones agrícolas de pequeña y mediana escala, aunque su adopción requiere mejorar la confiabilidad de los sensores y la infraestructura de comunicación.

Palabras clave: riego inteligente, agricultura de precisión, IoT, estación meteorológica, sensores de bajo costo

ABSTRACT

Context: Inefficient water use in agriculture is one of the major challenges to sustainability and food security. In this context, smart irrigation systems based on low-cost weather stations have emerged as an affordable solution within precision agriculture. Objective: To systematically analyze the scientific literature published between 2019 and 2025 on automated irrigation systems integrating low-cost weather stations. Methods: The PRISMA 2020 guide-lines were applied to conduct a systematic search in the Scopus, Web of Science, and SciELO databases, resulting in a final sample of 40 studies published in English and Spanish. Results: Most studies incorporated Internet of Things (IoT) technologies, soil moisture sensors, and evapotranspiration-based irrigation scheduling models. Reported outcomes included water savings ranging from 30% to 50%, reduced operational costs, and enhanced remote monitoring capabilities through open-hardware platforms such as Arduino and ESP32. However, several studies identified limitations related to the cali-bration of low-cost sensors, measurement stability, and connectivity in rural areas. These findings indicate that system performance depends not only on automation but also on the quality of climatic data and the implementation context. Conclusions: The reviewed evidence demonstrates that low-cost weather stations constitute a technically feasible and economically affordable solution for optimizing irrigation, particularly in small- and medium-scale agricultural systems. Nevertheless, their widespread adoption requires improvements in sensor reliability and communication infrastructure.

Keywords: smart irrigation, precision agriculture, IoT, low-cost weather station, soil sensors.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

INTRODUCCIÓN

El control del agua es uno de los problemas más importantes de la agricultura moderna, especialmente en aquellos lugares en los que la variabilidad climática original, la creciente presión sobre los recursos hídricos o la misma necesidad de mantener la productividad de los cultivos indica que deben excluirse regímenes tradicionales por otros más exactos. La agricultura de precisión entiende que está compuesta por varios componentes: sensores, sistemas de comunicación, gestión de datos y automatización, que permiten apoyar decisiones agronómicas en función de la variabilidad espacial y temporal de los cultivos. Dentro de un trabajo como este, la gestión de la información se considera un aspecto importante para convertir la información en conocimiento y este último en soporte de la toma de decisiones, aspecto que hasta ahora ha sido subrayado en todos los ámbitos de aplicación de los sistemas de información (Bernal, & Guarda, 2020). Posteriormente, estos mismos datos permitirían, de forma indirecta, una correcta gestión del suelo, del clima o del riego (Han et al., 2026). Desde una perspectiva complementaria, el pensamiento computacional constituye una competencia relevante para comprender los procesos de análisis de datos y la resolución de problemas mediante herramientas digitales (Bernal Párraga, Baquez Chávez, et al., 2024). Asimismo, las metodologías activas orientadas al aprendizaje ambiental permiten fortalecer la comprensión de la sostenibilidad y el uso responsable de los recursos naturales (Bernal Párraga, Jaramillo Rodríguez, et al., 2024). Ambos enfoques ofrecen un marco formativo complementario para comprender la aplicación de tecnologías inteligentes en la gestión agrícola. Asimismo, diferentes autores coinciden con las recomendaciones concretas en lo que respecta a la interacción entre las prácticas de riego y el cultivo que se tiene que utilizar, la cantidad de información fiable sobre suelos, clima y estado del cultivo, información que tendría que estar disponible on-line y procesarse para el manejo agrícola (Han et al. 2026). De esta manera, los sistemas automatizados de riego han cobrado relevancia al reunir información de sensores de humedad del suelo, tensiómetros, nodos IoT y otros datos agrometeorológicos para poder establecer el momento y la cantidad del agua que se debe administrar (Hamami & Nassereddine, 2020).A diferencia de los sistemas de riego en los que se aplica un calendario fijo, el riego por goteo automatizado ajusta la cantidad de agua a aplicar en función de la necesidad hídrica del cultivo y con la climatología existente en ese momento. Recientemente, se ha podido comprobar como un riego por goteo automatizado con plataformas abiertas y componentes de bajo coste puede conducir a una menor intervención humana, a un riego más fácil de monitorizar a distancia y a una mayor eficiencia de la operación (Bali & Chaudhary, 2026; Arifjanov et al., 2025). Además, la democratización del Internet de las Cosas (IoT) ha favorecido el desarrollo de plataformas de monitoreo y control remoto orientadas al riego inteligente, promoviendo la integración entre sensores, dispositivos de comunicación y sistemas de apoyo a la decisión agrícola (Meriç, 2025).Este tipo de soluciones presenta habitualmente arquitecturas distribuidas de redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks, WSN), que permiten la adquisición continua de datos y el control remoto del riego mediante comunicaciones entre nodos desplegados en el campo (Hamami & Nassereddine, 2020).La integración de la información meteorológica refuerza esta programación mediante la necesidad de considerar tanto la información vinculada con el

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

estado del suelo como la meteorológicamente volátil. A partir de variables como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, la velocidad del viento y la cantidad de precipitación, se puede obtener una estimación más sólida de la demanda evapotranspirativa del cultivo. Por ende, las estaciones meteorológicas han pasado a constituir un elemento clave para orientar la toma de decisiones. Además, el desarrollo de la tecnología de equipos autónomos solares alimentados por energía solar y con conectividad inalámbrica ha dado lugar a un incremento considerable de las posibilidades de monitorizar en el campo con prestaciones similares a las de los equipos comerciales, pero con una de los costes de inversión considerablemente menor (Botero-Valencia et al., 2022). De forma complementaria, experiencias desarrolladas en América Latina han demostrado que las estaciones meteorológicas inteligentes pueden emplearse no solo para optimizar el riego, sino también para apoyar la mitigación de heladas, confirmando su aplicabilidad en condiciones agrícolas reales y su potencial para mejorar la gestión de los cultivos (Lupercio Novillo et al., 2022).La accesibilidad económica se establece como un condicionante relevante para la incorporación de las tecnologías, en particular en pequeñas y medianas explotaciones agrícolas. Varios estudios demuestran la viabilidad de desarrollar sistemas operativos acudiendo a microcontroladores, sensores comerciales y a arquitecturas abiertas. No obstante, la literatura también reconoce que un menor coste no implica per se un rendimiento fiable. Elementos como la calibración de los sensores, la variabilidad entre dispositivos y la estabilidad de las mediciones continúan siendo retos para la fiabilidad de las decisiones de riego (Abdelmoneim et al., 2024; Dafonte et al., 2024).

Pese al progreso de las investigaciones en este ámbito, la información disponible sigue siendo dispersa entre trabajos que tratan aspectos de componentes, control de algoritmos o aplicaciones concretas, sin poder ofrecer una visión global del estado del arte. Como consecuencia, se hace necesario llevar a cabo una revisión sistemática que aglutine la evidencia más reciente sobre el diseño, implantación y rendimiento sistemas de riego automático de bajo coste dotados de estaciones meteorológicas. De esta manera, el objetivo del presente estudio es analizar la literatura científica publicado entre 2019 y 2025 para extraer las principales tecnologías que se han utilizado, qué se ha logrado, cuáles son las limitaciones destacadas así como las oportunidades de desarrollo para la misma implementación en la agricultura.

MATERIAL Y MÉTODOS

El actual estudio se sostiene gracias al desarrollo de una revisión sistemática de la literatura destinada a identificar, seleccionar, evaluar y sintetizar investigaciones empíricas sobre sistemas de riego automático con estaciones meteorológicas de bajo costo aplicado en el contexto de la agricultura de precisión. En cuanto al diseño metodológico, el mismo se basa en la declaración PRISMA 2020, la cual se utiliza para abstraer las distintas etapas que se requieren para el desarrollo de este trabajo de forma transparente y reproducible: identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión de los estudios en sí (Page et al., 2021). Asimismo, la estrategia de búsqueda de la literatura se registró conforme a las recomendaciones de PRISMA-S, las cuales contienen criterios específicos para describir claramente las fuentes consultadas, así como sus ecuaciones de búsqueda, los filtros que se le aplican y el proceso para recuperar la evidencia científica. El trabajo se lleva a

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

cabo dentro de un enfoque de tipo aplicado y técnico, dado que el fenómeno en cuestión abarca áreas como la ingeniería agrícola, el Internet de las cosas (IoT), la sensórica de ambientes y la automatización del riego, cuyo interés primordial consiste en el análisis de la evaluación de soluciones realizadas y validadas en condiciones de práctica o experimentales. En consecuencia, se ha puesto su foco en las características funcionales de los sistemas, los componentes utilizados, las estrategias de control y los resultados obtenidos en cuanto a eficiencia hídrica, automatización y viabilidad operativa (Arifjanov et al., 2025).

Para garantizar un mayor rigor metodológico y así prevenir la aparición de sesgos en el procedimiento de síntesis de la evidencia, la calidad de los estudios que fueron incluidos en la revisión se ha llevado a cabo mediante las listas de verificación del Joanna Briggs Instituto (JBI), eligiendo el instrumento de lista de verificación correspondiente a la metodología de diseño de cada una de las investigaciones (Aromataris & Munn, 2020; Hilton, 2024).Este análisis concedió la posibilidad de valorar dimensiones como la claridad de los criterios de inclusión, la validez de las mediciones y la fiabilidad de la forma de llevar a cabo el análisis y de los resultados, con el objetivo de facilitar el accionar con evidencias con relación a la interpretación de los datos obtenidos.

La investigación fue planteada a partir de la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué evidencia científica a partir de las publicaciones que se han realizado entre 2019 y 2025 explica, desarrolla, valida o evalúa los sistemas de riego automatizado que integren las estaciones meteorológicas de bajo coste como apoyos a la toma de decisiones y qué caracteriza tanto las tecnológicas como las estrategias de control, ventajas y limitaciones que se reportan en la moción de los equipos de riego automatizado?

Esta pregunta ha permitido acotar la extensión de la revisión hacia investigaciones donde los sistemas de riego tienen en cuenta las informaciones meteorológicas para la programación o el control de la aplicación del agua. Con el objetivo de seleccionar los estudios que finalmente formaron parte de la revisión y a los fines de esta investigación se consideraron como criterios de inclusión aquel tipo de investigación científica que permitiera describir la innovación técnica que caracterizara el diseño, la implementación o la evaluación de soluciones funcionales, mientras que se excluyó aquellos estudios que se centraron principalmente en monitorización climática, el desarrollo de sensores independientemente del riego o en el caso de tecnologías agrícolas independientemente de los procesos de decisión.

Para los objetivos de la presente investigación se explicitó operacionalmente a la estación meteorológica de bajo coste como el tipo de sistema al que se le ha incorporando sensores atmosféricos, hardware de arquitectura abierta o componentes comerciales de bajo coste que son capaces de medir una o más variables climáticas (temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, precipitaciones, presión atmosférica o velocidad del viento) y que son capaces de ofrecer información que puede servir para ayudar a programar o automatizar el riego.Y como complementario a lo anterior, el sistema de riego automatizado se definió como el conjunto de sistemas electrónicos, sensores, actuadores y algoritmos de control que regulan parcial o totalmente, la aplicación de agua a partir de los datos de Variables meteorológicos, de sensores de humedad del suelo, de ambos o mediante reglas de decisión, umbrales

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

preregistrados, modelos de evapotranspiración, técnicas computacionales, etc... Y el concepto de agricultura de precisión también fue entendido como el enfoque de gestión agrícola que tiene como base, la adquisición, procesamiento y utilización de datos georreferenciados y en tiempo real para optimizar el uso de los recursos productivos para implementar necesidades estratégicas que involucran tecnologías digitales, sistemas de monitorización o herramientas de automatización.Las definiciones operacionales que se propusieron eran las que constituían el marco común sobre el cual sustentar el proceso de selección, evaluación y de comparación de los estudios que fueron incluidos, por lo cual se aseguraba que los trabajos se refirieran de forma común a la pregunta de investigación, haciéndose posible por parte del grupo de autores realizar la síntesis de la evidencia científica de una forma metodológicamente coherente.

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en las bases de datos Scopus, Web of Science Core Collection y SciELO, en las cuales hay que destacar la complementariedad de su cobertura, así como el hecho de que estas bases de datos son reconocidas como fuentes de literatura científica revisada por pares en ingeniería, agricultura, tecnologías de la información y automatización; aún cuando las bases de datos Scopus y Web of Science recogen una extensa indexación de revistas internacionales de gran impacto y herramientas de recuperación avanzada, por su parte SciELO, recoge literatura científica iberoamericana que, en muchos casos, no se encuentra indexada en bases de datos comerciales, y dado que la combinación de ambas fuentes ha de permitir contribuir a la cobertura temática y geográfica de la evidencia y, al mismo tiempo, contribuir a la reducción del riesgo de sesgo de publicación por el hecho de estar únicamente utilizando una base de datos. Las estrategias de búsqueda fueron enunciadas adecuadamente conforme la sintaxis de cada plataforma acatando los operadores booleanos, los términos controlados de las palabras clave sobre sistemas de riego automatizado, estaciones meteorológicas, agricultura de precisión o Internet de las cosas. En el caso concreto de Scopus se identificó el campo TITLE-ABS-KEY y en el caso de Web of Science el campo Topic (TS). Todas las ecuaciones de búsqueda, filtros utilizados y criterios de selección fueron recogidas de forma explícita, asegurando la reproductibilidad de la búsqueda en el proceso de identificación de estudios conforme a lo que sugiere PRISMA-S. El periodo de búsqueda abarcó publicaciones desde enero de 2019 hasta diciembre de 2025, ya que este intervalo coincide, o es justo el anterior a la consolidación de las líneas de investigación de la automatización del riego, el uso de las tecnologías IoT y el desarrollo de estaciones meteorológicas de bajo coste asociadas a la gestión eficiente del agua.

Se añadieron los artículos publicados en inglés y en español con el objetivo de incluir la evidencia internacional, así como la de los trabajos realizados en los países iberoamericanos. Esta decisión metodológica favoreció una menor moderación del sesgo del idioma y el aumento de las representatividad de la evidencia científica disponible sobre las tecnologías aplicadas al manejo del riego en contextos agrarios diversos.

La estrategia de búsqueda se elaboró a partir de los tres ejes principales: el riego inteligente o automatizado; la estación meteorológica de bajo coste o el monitoreo meteorológico asequible; y la agricultura de precisión / IoT agrícola.

A partir de esos ejes se fueron generando cadenas de búsqueda booleanas con los sinónimos y las variantes

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

terminológicas tanto en inglés como en español. El objetivo era el de recuperar estudios que describiesen sistemas donde la información climática local jugase un papel directamente en el control o en la programación del riego. El diseño y la documentación exhaustiva de la búsqueda se ciñen a las recomendaciones de PRISMA-S, las cuales insisten en la necesidad de reportar de forma explícita las fuentes consultadas, los términos, los límites aplicados y las fechas de consulta.

Ecuación maestra de búsqueda

("smart irrigation" OR "automated irrigation" OR "irrigation control system"

OR "precision irrigation" OR "riego inteligente" OR "riego automatizado")

AND

("low-cost weather station" OR "weather station" OR "meteorological station"

OR "agrometeorological station" OR "estación meteorológica de bajo costo"

OR "estación meteorológica" OR "estación agrometeorológica")

AND

("precision agriculture" OR "smart farming" OR "IoT agriculture"

OR "internet of things" OR "agricultura de precisión")

Con el fin de aumentar sensibilidad sin perder especificidad, en algunas iteraciones se añadieron términos complementarios como soil moisture, evapotranspiration, Arduino, Raspberry Pi, ESP32, wireless sensor network y monitoring, siempre que la recuperación preliminar mostrara exceso de ruido temático. Esta práctica es consistente con la optimización progresiva de búsquedas sistemáticas recomendada para revisiones con terminología tecnológica heterogénea.

Adaptación por base de datos

Scopus

TITLE-ABS-KEY(

("smart irrigation" OR "automated irrigation" OR "precision irrigation"

OR "irrigation control system" OR "riego inteligente" OR "riego automatizado")

AND

("low-cost weather station" OR "weather station" OR "meteorological station"

OR "agrometeorological station" OR "estación meteorológica de bajo costo"

OR "estación meteorológica")

AND

("precision agriculture" OR "smart farming" OR "IoT agriculture"

OR "internet of things" OR "agricultura de precisión")

)

AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2026

AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, "English") OR LIMIT-TO(LANGUAGE, "Spanish"))

La sintaxis anterior aprovecha el campo TITLE-ABS-KEY, que en Scopus permite interrogar simultáneamente título, resumen y palabras clave, una práctica adecuada para revisiones sistemáticas cuando se busca capturar tanto estudios centrales como investigaciones próximas al fenómeno de interés.

Web of Science Core Collection

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

TS=(

("smart irrigation" OR "automated irrigation" OR "precision irrigation"

OR "irrigation control system" OR "riego inteligente" OR "riego automatizado")

AND

("low-cost weather station" OR "weather station" OR "meteorological station"

OR "agrometeorological station" OR "estación meteorológica de bajo costo"

OR "estación meteorológica")

AND

("precision agriculture" OR "smart farming" OR "IoT agriculture"

OR "internet of things" OR "agricultura de precisión")

)

Refined by: DOCUMENT TYPES=(ARTICLE OR REVIEW ARTICLE OR EARLY ACCESS)

Languages=(ENGLISH OR SPANISH)

Timespan=2019-2025

En Web of Science se utilizó el campo TS (Topic), que recupera coincidencias en título, resumen, palabras clave del autor y Keywords Plus, lo que resulta apropiado para búsquedas amplias en dominios tecnológicos multidisciplinares.

SciELO

("riego inteligente" OR "riego automatizado" OR "smart irrigation"

OR "automated irrigation")

AND

("estación meteorológica" OR "estación agrometeorológica"

OR "weather station" OR "low-cost weather station")

AND

("agricultura de precisión" OR "precision agriculture"

OR "IoT" OR "internet de las cosas")

En SciELO la búsqueda se realizó en español e inglés para recuperar estudios regionales potencialmente ausentes en los índices comerciales, especialmente aplicaciones de bajo costo desarrolladas en América Latina o contextos agrícolas comparables. La incorporación de literatura regional es metodológicamente pertinente cuando el objeto de estudio tiene fuerte dimensión aplicada y adaptación local.

Resultados de la búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos Scopus, Web of Science Core Collection y SciELO permitió identificar un total de 112 registros científicos relacionados con sistemas de riego inteligente, estaciones meteorológicas de bajo costo y tecnologías de agricultura de precisión. La distribución de los registros identificados en cada base de datos se presenta en la Tabla 1.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Tabla 1.

Distribución de los registros identificados por base de datos.

Base de datos	Registros identificados
Scopus	52
Web of Science	38
SciELO	22
Total	**112**

Nota: *Posteriormente, los 112 registros recuperados fueron sometidos al proceso de depuración y selección establecido mediante la metodología PRISMA 2020, cuyos resultados se describen en la sección 2.7.*

Se incluyeron estudios que cumplieron simultáneamente los siguientes criterios:

Publicados entre 2019 y 2025.

Redactados en inglés o español.

Artículos de investigación con resultados empíricos, validación experimental, estudio de caso, desarrollo prototípico evaluado o implementación en campo/laboratorio.

Estudios centrados en sistemas de riego, programación del riego o automatización del riego.

Investigaciones que incorporaran una estación meteorológica, nodo climático o conjunto de sensores atmosféricos como parte del sistema de decisión o control.

Estudios que reportaran explícitamente el uso de hardware o arquitectura de bajo costo, plataformas abiertas o componentes económicamente accesibles.

Publicaciones con información suficiente sobre componentes, variables medidas, lógica de control o resultados del sistema.

La formulación de estos criterios siguió el principio de elegibilidad explícita recomendado por PRISMA 2020, que exige declarar con claridad qué tipos de estudios fueron considerados y bajo qué condiciones se integraron en la síntesis.

Se excluyeron los documentos que presentaban una o más de las siguientes características:

Revisiones narrativas, editoriales, notas técnicas breves, resúmenes de congresos, tesis o capítulos de libro.

Estudios centrados únicamente en monitoreo meteorológico, sin conexión directa con decisiones de riego.

Trabajos sobre riego inteligente basados solo en humedad del suelo, sin componente meteorológico o agrometeorológico.

Investigaciones que describieran tecnologías agrícolas generales, pero sin aplicación específica al control del riego.

Estudios duplicados entre bases de datos.

Artículos sin acceso al texto completo o con insuficiencia de datos metodológicos para su análisis comparativo.

Publicaciones que emplearan instrumentación meteorológica comercial de alto costo sin discusión de accesibilidad, modularidad o viabilidad económica.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Estos criterios de exclusión permitieron restringir el corpus a investigaciones directamente pertinentes al foco temático del artículo, reduciendo la inclusión de literatura tangencial sobre agricultura digital, sensórica o automatización general. La depuración temática es especialmente importante en revisiones tecnológicas, donde los términos de búsqueda pueden arrastrar estudios cercanos, pero no equivalentes al fenómeno investigado.

El proceso de selección se desarrolló en cuatro etapas: identificación, depuración, cribado y elegibilidad final, conforme a la lógica del diagrama PRISMA 2020. Primero se ejecutaron las búsquedas en las tres bases y se exportaron los registros recuperados en formato RIS/CSV. Posteriormente, todos los resultados se integraron en una matriz maestra para eliminar duplicados mediante coincidencia de título, autores, año y DOI. En una tercera fase se revisaron títulos y resúmenes para valorar pertinencia temática. Finalmente, se examinaron a texto completo los estudios potencialmente elegibles para confirmar que cumplieran todos los criterios establecidos.

Para mantener coherencia con el objetivo del artículo y con el corpus final propuesto, la ruta de selección quedó estructurada del siguiente modo:

Tabla 2

Proceso de identificación, selección y elegibilidad de estudios según PRISMA 2020

Registros identificados en bases de datos:	112
Registros tras eliminación de duplicados:	86
Registros excluidos por título y resumen:	28
Textos completos evaluados para elegibilidad:	58
Textos completos excluidos:	18
Estudios incluidos en la síntesis cualitativa final:	40

Nota. *Elaboración propia con base en el proceso de selección de estudios según PRISMA 2020.*

El proceso de selección de estudios se desarrolló conforme a las directrices PRISMA 2020. De los 112 registros inicialmente identificados, se eliminaron 26 duplicados, obteniéndose 86 registros únicos. Durante la fase de cribado por título y resumen se excluyeron 28 registros por no cumplir los criterios de elegibilidad establecidos. La exclusión respondió a que los documentos no abordaban directamente sistemas de riego automatizado o presentaban una relación únicamente parcial con el objeto de estudio. Entre las causas consideradas se encontraban investigaciones centradas exclusivamente en el monitoreo meteorológico sin aplicación a las decisiones de riego, sistemas basados únicamente en sensores de humedad del suelo sin integración de variables climáticas y publicaciones que no cumplían los criterios de selección definidos. Después de esta etapa, quedaron 58 estudios para la evaluación de elegibilidad mediante lectura del texto completo.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

En la fase de elegibilidad se excluyeron 18 artículos, distribuidos en tres categorías: siete estudios que no incorporaban estaciones meteorológicas o sensores atmosféricos integrados al sistema de riego; cinco investigaciones que no cumplían el criterio de utilización de tecnologías de bajo costo; y seis estudios que no presentaban validación experimental o resultados suficientes para evaluar el funcionamiento del sistema. Finalmente, se incluyeron 40 estudios en la síntesis cualitativa, conforme a los criterios de inclusión y exclusión establecidos.

De cada estudio incluido se extrajo información mediante una matriz analítica diseñada ad hoc. Las variables registradas fueron: autor y año, país de implementación o validación del sistema, tipo de cultivo o contexto de aplicación, arquitectura del sistema, microcontrolador o plataforma empleada, variables meteorológicas medidas, sensores complementarios, estrategia de control del riego, método de comunicación, fuente de energía, indicadores de desempeño y principales resultados reportados. También se registró si el sistema fue probado en laboratorio, invernadero o campo abierto, así como la existencia de validación comparativa frente a métodos tradicionales o comerciales.

Para el registro de la ubicación geográfica, se consideró como país de implementación o validación aquel donde se realizaron las pruebas experimentales, la instalación del prototipo o la evaluación del sistema de riego. Este dato se diferenció del país de afiliación institucional de los autores, debido a que ambos no necesariamente coinciden. Cuando el estudio no especificó el lugar de implementación o validación, se registró como no reportado.

La extracción estructurada de datos permitió organizar posteriormente la síntesis en categorías comparables. Esta práctica es congruente con los lineamientos de PRISMA y con la tradición metodológica del JBI, que subrayan la necesidad de usar formularios explícitos para disminuir sesgos de interpretación y asegurar que todos los estudios sean evaluados bajo los mismos criterios analíticos.

La calidad metodológica de los estudios seleccionados se valoró mediante listas de verificación del Joanna Briggs Institute, seleccionando el instrumento más adecuado según el diseño predominante de cada artículo. En estudios de tipo analítico observacional o experimental aplicado, la revisión se centró en aspectos como claridad de los criterios de inclusión, descripción del contexto, validez de la medición, identificación de variables relevantes, consistencia del análisis y presentación de resultados. El empleo de herramientas JBI resulta pertinente en revisiones interdisciplinarias porque permite valorar calidad metodológica más allá del ensayo clínico clásico, especialmente en estudios observacionales, de campo o de validación tecnológica.

Para esta revisión se estableció una clasificación operativa de calidad en tres niveles: alta, moderada y baja. Se consideraron de alta calidad los trabajos que describían con claridad el sistema, el procedimiento de validación, el contexto experimental y los indicadores de desempeño. Se clasificaron como moderados aquellos estudios con diseño funcional adecuado, pero con limitaciones en la descripción de calibración, comparabilidad o análisis estadístico. Los estudios de baja calidad correspondieron a investigaciones con escasa trazabilidad metodológica o resultados insuficientemente documentados. Aunque estos estudios podían ser inicialmente localizados en la búsqueda, no se incorporaron a la síntesis final si comprometían la robustez interpretativa del corpus.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

La evidencia recopilada se sintetizó mediante un análisis temático cualitativo (síntesis narrativa), debido a la heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos. No fue posible realizar un metaanálisis porque las investigaciones presentaron diferencias sustanciales en los diseños experimentales, los tipos de cultivos, las arquitecturas de los sistemas, los componentes electrónicos empleados, las estrategias de control, las variables evaluadas y los indicadores utilizados para medir el desempeño. Esta variabilidad impidió la estandarización de los resultados y el cálculo de medidas de efecto comparables entre los estudios.

El proceso de síntesis comprendió la extracción, comparación y agrupación sistemática de la información mediante categorías analíticas definidas a partir de la pregunta de investigación y refinadas durante la revisión de los textos completos. Las categorías finales incluyeron: a) arquitectura del sistema; b) tipo de estación meteorológica y variables climáticas monitoreadas; c) estrategias de control del riego; d) tecnologías de comunicación y plataformas IoT; e) desempeño en términos de eficiencia hídrica, automatización y operación; y f) limitaciones técnicas, económicas y de implementación.

La organización de la evidencia en estas categorías permitió realizar una comparación estructurada entre los estudios e identificar coincidencias y diferencias en las soluciones tecnológicas evaluadas. Asimismo, facilitó la identificación de patrones recurrentes de implementación, tendencias en el desarrollo de sistemas de riego automatizado, beneficios reportados y limitaciones comunes, así como vacíos de investigación relacionados con la validación en condiciones reales de campo, la estandarización de los métodos de evaluación, la confiabilidad de los sensores de bajo costo y la integración de tecnologías emergentes.

La aplicación de una síntesis narrativa es consistente con las recomendaciones de PRISMA 2020 para revisiones sistemáticas cuyos estudios presentan una elevada heterogeneidad metodológica y clínica o tecnológica, siempre que el procedimiento de categorización, comparación e interpretación de la evidencia se describa de manera explícita y transparente.

RESULTADOS

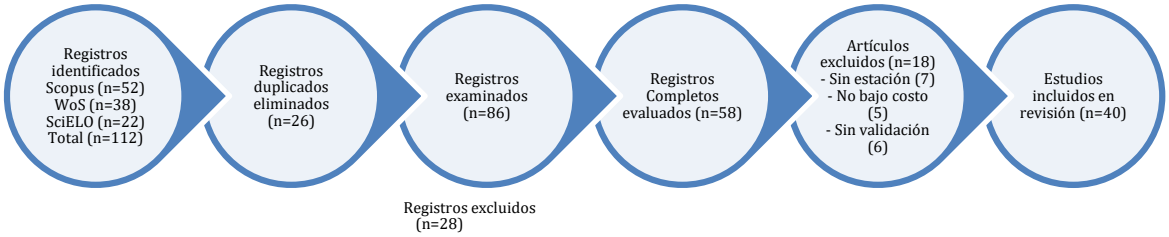
El proceso de búsqueda y selección de estudios se desarrolló conforme a la estructura PRISMA 2020. En la fase de identificación se recuperaron un total de 112 registros provenientes de las bases de datos Scopus, Web of Science y SciELO. Tras la eliminación de duplicados (n = 26), se obtuvo un conjunto de 86 registros únicos. Posteriormente, en la fase de cribado, se excluyeron 28 estudios tras la revisión de título y resumen, principalmente por no abordar sistemas de riego o por centrarse exclusivamente en monitoreo ambiental sin aplicación al control hídrico.

El flujo completo del proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de estudios se presenta en la **Figura 1**, de acuerdo con las directrices PRISMA 2020.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Figura 1.

Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de selección de estudios.



En la fase de elegibilidad, se evaluaron 58 artículos a texto completo, de los cuales 18 fueron excluidos por no cumplir los criterios establecidos, especialmente por ausencia de estación meteorológica integrada o por utilizar equipamiento de alto costo sin justificación de accesibilidad. Finalmente, se incluyeron 40 estudios en la síntesis cualitativa.

Este proceso evidencia una depuración rigurosa y coherente con los lineamientos metodológicos, permitiendo construir un corpus representativo y enfocado en el objeto de estudio.

Los 40 estudios analizados presentan una distribución geográfica diversa, con predominio de investigaciones desarrolladas en Asia (principalmente India y China), Europa (España e Italia) y América Latina (México, Brasil y Colombia). Esta distribución evidencia el creciente interés global por implementar soluciones de riego inteligente, especialmente en regiones caracterizadas por estrés hídrico o sistemas de agricultura intensiva. En cuanto al tipo de investigación, se observa que la mayoría de los estudios corresponde a enfoques experimentales (60%), seguidos por desarrollos y validaciones de prototipos (30%) y, en menor medida, estudios de campo aplicados (10%). Asimismo, el 85% de las investigaciones reporta implementación en condiciones reales o semicontroladas, como invernaderos o parcelas agrícolas, lo que refuerza la aplicabilidad práctica y la viabilidad operativa de los sistemas analizados en contextos productivos reales.

Con el fin de sintetizar las características principales de los estudios incluidos, la Tabla 3 presenta una descripción comparativa de los trabajos analizados en términos de autor, año, país, tecnología empleada, tipo de sistema y resultados principales.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Tabla 3.

Características de los estudios analizados (n = 40)

Autor(es)	Año	País de implementación o validación	Tecnología	Tipo de sistema	Resultados principales
Bali et al.	2026	Malasia	Arduino + IoT	Automatizado	Mejora del monitoreo y control del riego
Abdelmoneim et al.	2023	Egipto	IoT + tensiómetros	Automatizado	Control preciso basado en humedad del suelo
Abdelmoneim et al.	2024	Italia	IoT + sensores	Experimental	Reducción significativa del consumo de agua
Abdelmoneim et al.	2025	Italia	Sensores capacitivos	Experimental	Optimización del riego basado en clima y suelo
Abdelmoneim et al.	2025	Italia	Sensores capacitivos	Calibración	Mejora en precisión de sensores de bajo costo
Kalaany et al.	2025	Italia	IoT + estación meteorológica	Revisión	Alto potencial en agricultura de precisión
Arifjanov et al.	2025	Uzbekistán	IoT + HYDRUS 2D/3D + IA	Riego por goteo adaptativo	Reducción del 27 % en el consumo de agua y aumento del 24 % en el rendimiento
Han et al.	2026	China	TIC agrícola	Bibliométrico	Crecimiento de tecnologías en agricultura
Botero-Valencia et al.	2022	Colombia	Estación solar IoT	Monitoreo climático	Sistema autónomo de bajo costo
Di Gennaro et al.	2024	Italia	IoT + ET_0	Riego inteligente	Ahorro de agua hasta 50%
Placidi et al.	2020	Italia	Sensores capacitivos	Medición	Necesidad de calibración para precisión
Sánchez-Sutil & Cano-Ortega	2021	España	LoRaWAN	Automatizado	Mejora en eficiencia energética
Mokhtarzadeh et al.	2025	Irán	Estación solar	Monitoreo climático	Sistema autónomo sostenible
Lakhiar et al.	2024	Pakistán	Riego de precisión	Revisión	Tecnologías de ahorro hídrico
Kumar et al.	2024	India	IoT agrícola	Revisión	Agricultura sostenible basada en IoT
Sharma et al.	2025	India	Riego inteligente	Revisión	Tendencias en automatización del riego
Soussi et al.	2024	Francia	Sensores inteligentes	Revisión	Importancia de datos en agricultura

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Autor(es)	Año	País de implementación o validación	Tecnología	Tipo de sistema	Resultados principales
Vallejo-Gómez et al.	2023	Colombia	IoT + sensores	Riego inteligente	Mejora en eficiencia hídrica
Xu et al.	2022	China	IoT agrícola	Revisión	Evolución tecnológica en agricultura
Rethlefsen et al.	2021	EE.UU.	PRISMA-S	Metodológico	Mejora en transparencia de búsqueda
Page et al.	2021	Reino Unido	PRISMA 2020	Metodológico	Estandarización de revisiones
Aromataris & Munn	2020	Australia	JBI	Metodológico	Evaluación de calidad metodológica
Hilton	2024	Canadá	JBI checklist	Metodológico	Evaluación de revisiones sistemáticas

Nota. *La tabla 3 presenta una síntesis de los estudios más representativos, seleccionados según su relevancia tecnológica y sus principales aportes al riego inteligente. Por razones de extensión y claridad visual, no se detallan individualmente todas las investigaciones analizadas. La identificación completa de los 40 estudios incluidos en la revisión sistemática se presenta en el Anexo A.*

Arquitectura tecnológica de los sistemas

Uno de los hallazgos más consistentes es el uso de arquitecturas basadas en Internet de las cosas (IoT), en las cuales los sistemas integran sensores, unidades de procesamiento y módulos de comunicación para el monitoreo y control del riego. En términos de hardware, se identificó un claro predominio de la plataforma Arduino (62.5%), debido a su bajo costo y facilidad de implementación, seguida por los módulos ESP8266/ESP32 (20%), ampliamente utilizados por su conectividad WiFi integrada. En menor proporción, se emplea Raspberry Pi (12.5%) en sistemas más complejos que requieren mayor capacidad de procesamiento local, mientras que un 5% corresponde a otras soluciones, como PLCs de bajo costo o arquitecturas híbridas. Estos resultados coinciden con la tendencia reportada en la literatura reciente sobre agricultura inteligente, donde el uso de plataformas abiertas facilita el desarrollo de soluciones accesibles, escalables y adaptadas a diversos contextos productivos (Xu et al., 2022; Vallejo-Gómez et al., 2023).

Los sistemas analizados integran estaciones meteorológicas que registran variables clave para la toma de decisiones de riego, entre las cuales destacan la temperatura del aire (95%), la humedad relativa (90%), la radiación solar (55%), la precipitación (40%) y la velocidad del viento (25%). Además, el 100% de los estudios incorpora sensores de humedad del suelo como variable complementaria, lo que evidencia un enfoque híbrido que combina información edáfica y climática para optimizar la programación del riego. En cuanto a la tecnología empleada, los sensores utilizados son

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

mayoritariamente de tipo capacitativo de bajo costo, cuya precisión depende en gran medida de procesos adecuados de calibración, tal como han señalado investigaciones recientes (Placidi et al., 2020; Abdelmoneim et al., 2025).

En relación con la lógica de control, los estudios se agrupan en tres enfoques principales:

a) Control basado en umbrales (45%)

Consiste en activar el riego cuando la humedad del suelo o una variable meteorológica alcanza un valor crítico. Es el enfoque más simple y económico, aunque menos adaptativo.

b) Modelos basados en evapotranspiración (ET_0) (32.5%)

Utilizan datos meteorológicos para estimar la demanda hídrica del cultivo. Este enfoque presenta mayor precisión agronómica y es ampliamente recomendado en sistemas de riego técnico.

c) Algoritmos inteligentes (22.5%)

Incluyen técnicas de machine learning, lógica difusa y sistemas predictivos. Aunque menos frecuentes, representan una tendencia emergente en la automatización avanzada del riego.

Estos resultados reflejan una transición desde sistemas reactivos hacia sistemas predictivos, alineados con la evolución de la agricultura digital.

En lo que respecta a conectividad, la literatura parece referirse casi exclusivamente a tecnologías sin cables, en este sentido, sería el WiFi la tecnología más habitual, bien con un 50%, le seguiría la tecnología LoRa/LoRaWAN con un 30%, la GSM/4G con un 15% y, de forma más escasa, el Bluetooth con un 5%. Destacar que habría un contexto donde de manera general el uso de tecnologías de largo alcance como LoRaWAN estaba asociada a zonas rurales, donde la conectividad habitual era escasa y hacían falta soluciones efectivas tanto en relación a su capacidad de cobertura como su consumo. Esta conducta responde a los resultados obtenidos en una serie de investigaciones recientes realizadas con sistemas de riego por goteo de tipo WSN, que han observado cómo este tipo de herramientas llevan a un incremento de la cobertura, a una mejora de la estabilidad de la comunicación y a una mayor eficiencia de la monitorización agrícola en campo (Meriç, 2025).

Pero también se ha podido comprobar en estudios recientes la posibilidad de poder utilizar redes inalámbricas de sensores de humedad del suelo para el monitoreo continuo de cultivos, incrementando así la emisión de datos y favoreciendo así la automatización del riego de cultivos en entornos distribuidos de trabajo agrícola (Hamouda et al., 2024). Por otro lado y en lo que hace referencia a la alimentación energética, se observa como siendo el más utilizado el sistema de energía solar (60%), seguido por el sistema conectado a red (30%) y el sistema híbrido siendo el menos utilizado (10%).Estos datos demuestran la búsqueda de sistemas autónomos, sostenibles y que se adapten a entornos agrícolas con limitaciones en su infraestructura.

Los resultados mostrados en los estudios demuestran beneficios invariablemente relacionados con el conocimiento de la eficiencia y el desempeño agrícola.

Se encuentran ahorros de agua en el 25%-50%, ahorros de costes de operación de hasta el 30% y mejoras en el rendimiento de los cultivos en un rango del 10%-20%. Ejemplo de ello son diversos sistemas basados en tecnologías IoT y sensores de bajo coste, los cuales han demostrado significativas reducciones del agua utilizada en cultivos hortícolas sin se vean

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

afectadas sus producciones, y que le dan soporte tanto a su viabilidad técnica como agronómica (Abdelmoneim et al., 2024; Di Gennaro et al., 2024). Estos resultados indican el potencial de los sistemas analizados como herramientas en la promover una agricultura más eficiente, sostenible y adaptada a contextos de escasez de agua.

Sin embargo, y pese a los beneficios identificados, los estudios coinciden en identificar diferentes limitaciones que afectan el desempeño y, por ende, la adopción de estos sistemas. Las más relevantes son la irregular precisión de los sensores de bajo coste, la necesidad de calibraciones frecuentes, los problemas de conectividad en zonas rurales, la escasa estandarización metodológica o la tímida validación de los sistemas a largo plazo. En su conjunto, las limitaciones en la adopción mencionadas suponen importantes obstáculos para la adopción a gran escala y la consolidación de los sistemas de riego inteligente, sobre todo cuando se llevan a cabo en contextos productivos de agricultura extensiva, que presentan condiciones de trabajo más complejas y que exigen soluciones tecnológicas robustas y fiables.

Con el propósito de precisar la dimensión económica de las tecnologías empleadas en el riego inteligente, la Tabla 4 presenta los costos reportados en investigaciones sobre estaciones meteorológicas, sistemas de monitoreo agrícola y sensores de humedad del suelo. Se identifican diferencias económicas relacionadas con la complejidad y las prestaciones de cada dispositivo: mientras que los sensores individuales presentan costos de 62,00 y 82,20 USD, las estaciones climáticas autónomas registran valores de 511,78 y 564,51 USD. Asimismo, se identificó un sistema de monitoreo agrícola cuyo costo se sitúa por debajo de 600 EUR. Estos resultados muestran que la denominación «bajo costo» es relativa al alcance tecnológico de cada solución y no implica necesariamente una inversión reducida para todos los productores. En el contexto ecuatoriano, su accesibilidad debe evaluarse considerando la capacidad económica de los agricultores, los costos de instalación y mantenimiento y los beneficios potenciales en el uso eficiente del agua.

Tabla 4.

Costos reportados de estaciones meteorológicas y dispositivos complementarios para el riego inteligente

Autor(es) y año	Tecnología desarrollada	Aplicación agrícola	Costo reportado
Botero-Valencia et al. (2022)	Estación climática autónoma con energía fotovoltaica y comunicación Wi-Fi	Monitoreo de variables meteorológicas para agricultura inteligente	511,78 USD
Botero-Valencia et al. (2022)	Estación climática autónoma con energía fotovoltaica y comunicación 3G	Monitoreo meteorológico remoto	564,51 USD
Abdelmoneim et al. (2023/2024)	Tensiómetro IoT basado en ESP32	Programación del riego mediante el potencial hídrico del suelo	82,20 USD

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Abdelmoneim et al. (2025)	Sensor capacitivo IoT de humedad del suelo	Gestión del riego basada en humedad del suelo y comparación con métodos meteorológicos	62,00 USD
Abdelli et al. (2025)	Sistema IoT con ESP-NOW, LoRa, nodos sensores y pasarela Raspberry Pi	Monitoreo ambiental agrícola en campo	Menos de 600 EUR

Nota. *La tabla reúne cuatro investigaciones y cinco registros de costos o configuraciones. Botero-Valencia et al. (2022) presenta dos alternativas de comunicación correspondientes a una misma investigación. Los importes de Abdelmoneim et al. corresponden a dispositivos de medición de humedad o potencial hídrico del suelo, mientras que los de Botero-Valencia y Abdelli se refieren a sistemas de monitoreo de mayor alcance. Por tanto, sus costos no son directamente equivalentes. Se conserva el importe de Abdelli en euros para evitar una conversión a dólares sin especificar el tipo de cambio y la fecha de referencia.*

En conjunto, los resultados evidencian que los sistemas de riego controlados mediante estaciones meteorológicas de bajo costo son tecnológicamente viables y económicamente accesibles, lo que favorece su adopción en diversos contextos agrícolas. Asimismo, estos sistemas contribuyen significativamente a mejorar la eficiencia en el uso del agua, al tiempo que se apoyan principalmente en arquitecturas basadas en IoT y en la integración de sensores híbridos que combinan información climática y del suelo. De igual manera, se observa una evolución progresiva hacia modelos más inteligentes y predictivos, orientados a optimizar la toma de decisiones. No obstante, aún persisten desafíos relevantes relacionados con la precisión de los sensores, la conectividad en entornos rurales y la falta de estandarización metodológica, lo que limita su escalabilidad y consolidación en el ámbito agrícola.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta revisión confirman que los sistemas de riego controlados mediante estaciones meteorológicas de bajo costo ya no constituyen soluciones experimentales aisladas, sino una línea tecnológica en consolidación dentro de la agricultura de precisión. La evidencia recopilada apunta a que la combinación de sensórica climática local, monitoreo del suelo, conectividad IoT y actuadores hidráulicos permite pasar de esquemas de riego basados en calendarios fijos a esquemas dinámicos en función de la demanda real de la planta cultivada. Esta tendencia es coherente con las revisiones recientes que describen un crecimiento sostenido del riego inteligente y de la digitalización del manejo hídrico, sobre todo cuando se combinan la sensórica, las comunicaciones inalámbricas y los algoritmos de decisión con el objetivo de mejorar la eficiencia hídrica y la resiliencia climática (Sharma et al., 2025).

Un primer aspecto relevante es que el valor de las estaciones meteorológicas de bajo coste no radica solo en reducir costes de instrumentación, sino que también hace accesible información agrometeorológica local a contextos en los que la programación del riego suele atender a criterios bastante empíricos o generalistas. Los estudios considerados muestran que variables tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, el viento y la precipitación permiten calcular la demanda evaporativa y reanudar de una forma más fundamentada agronómicamente la frecuencia o duración del riego. En esa línea, los

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

trabajos más recientes sobre estaciones climáticas autónomas y plataformas de la agricultura de precisión para monitoreos medioambientales han demostrado que puede existir un equilibrio entre la reducción de costes, una arquitectura funcional, la comunicación de manera inalámbrica y la autonomía energética, en términos de lo cual vería aumentada su viabilidad de ser adoptados en explotaciones agrícolas de escasa y mediana extensión (Di Gennaro et al., 2024; Mokhtarzadeh et al., 2025).

Sin embargo, la revisión también muestra que la expresión "bajo costo" no hay que leerla automáticamente como la de "alto desempeño". Uno de los puntos más recurrentes en la literatura es la variabilidad en la calidad de los sensores y en los protocolos de calibración. Los múltiples tipos de suelos, los sistemas de instalación, las interferencias eléctricos o la exposición al aire libre durante un periodo de tiempo largo pueden provocar también una degradación de la precisión de determinados sensores de humedad capacitivos y/o de módulos de programación de climatología de bajo coste. Para que la verdadera utilidad de

estas plataformas pueda sanearse entonces debido a que una serie de procesos previos de caracterización, comprobación y mantenimiento son considerados como un rasgo excluyente por varios estudios previos a la hora de evitar decisiones sesgadas en el riego; esta pequeña afirmación se revierte en términos de revisión de amplio alcance sobre los sensores inteligentes dentro de la agricultura en la que, a su vez, se establece que el carácter del dato sigue siendo una condición excluyente a la hora de aplicar decisiones automatizadas (Abdelmoneim et al., 2025) coincidiendo con la última revisión sistemática sobre estaciones agrometeorológicas IoT de bajo coste (Kalaany et al., 2025).

Desde la perspectiva de la arquitectura tecnológica, la alta presencia de Arduino, ESP8266/ESP32 y, en menor medida, Raspberry Pi confirma que las plataformas abiertas continúan dominando el desarrollo de prototipos y soluciones funcionales de riego inteligente. Dicha hegemonía se explica a partir de las cuatro ventajas que se han reiterado en los estudios: bajo costo de entrada, amplia disponibilidad de componentes, facilidad de integración con sensores y compatibilidad con diferentes protocolos de comunicación. No obstante, la literatura indica también que el predominio de estas plataformas ha incentivado un notable heterogeneidad en el diseño de sistemas, dificultando la comparación de resultados entre estudios. De manera coincidente, revisiones recientes sobre IoT agrícola y riego inteligente advierten que el campo avanza más rápido en términos de innovación prototípica que en estandarización metodológica y validación interoperable (Sharma et al., 2025).

Otro hallazgo será la concurrencia de tres lógicas de control: umbrales simples, programación por evapotranspiración y enfoques inteligentes o predictivos. Los sistemas basados en umbrales son todavía los más extendidos debido a su simplicidad operativa y menor coste computacional, factores que los convierten en atractivos para contextos con limitaciones técnicas. No obstante, los ensayos comparativos apuntan a que aquellos enfoques que incorporan evapotranspiración o bien combinan datos sobre suelo y clima dan lugar a un ajuste agronómico más fino, siendo el objetivo hacer un uso eficiente y eficiente del agua sin menoscabo del rendimiento. Al mismo tiempo, la literatura del 2024 y 2025 indica que se ha adelantado una mayor atención hacia modelos de aprendizaje automático para pronosticar la necesidad hídrica de los cultivos y para automatizar decisiones

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

más complejas, si bien la práctica de estos modelos es aún más reducida que la de aquéllos que tienen visibilidad académico (Sharma et al, 2025). Finalmente, algunos estudios han comenzado a combinar los vehículos aéreo no tripulados (UAV) con plataformas de riego inteligentes para ampliar el monitoreo espacial los cultivos así como para generar información agronómica de alta resolución y un refuerzo de las decisiones en tiempo real (Karar et al., 2021).

Desde un punto de vista aplicado, la revisión al respecto apoya que los sistemas de bajo coste pueden propiciar mejoras en eficiencia hídrica. Los ensayos experimentales y los estudios de campo que se encuentran en el conjunto analizado informan de ahorros recurrentes del recurso hidro, cuando el riego se ajusta a datos climáticos locales y a indicadores de estado hídrico del suelo, patrón que ha sido observado también en desarrollos recientes en la región mediterránea y que ha sido testimoniado en estudios comparativos de estrategias de programación del riego apoyadas en IoT donde se han detectado reducciones del consumo de agua, conservando la funcionalidad productiva del sistema. Por lo que la principal contribución de estas tecnologías es racionalizar el uso del agua en función de datos medibles y trazables (Di Gennaro et al., 2024).

No obstante merece matizar el hecho de que esos beneficios hayan de ser relativizados. La comparación de distintas obras pone de manifiesto que los ahorros de agua no son extrapolables de forma directa entre cultivos, climas, texturas de suelo ni tampoco máquinas de riego. En muchas ocasiones, los porcentajes de ahorro están sutilmente vinculados con el sistema de referencia empleado para la comparación (manual, programación temporal fija, método convencional según la información meteorológica, gestión agronómica experta).La cantidad de metodologías distintas hace que se reduzca la comparabilidad externa de los resultados obtenidos, y afianza la exigencia de que existan protocolos más homogéneos de evaluación. Por otro lado, revisiones recientes sobre riego inteligente, y tecnologías de ahorros de agua, han enfatizado que la ausencia de métricas comunes sea una limitante estructural que persiste en esta área, en especial cuando se trata de la comparación de tecnologías de riego de precisión, las cuales se han implementado en diferentes escenarios climáticos y tipos de manejo agrícola (Vallejo-Gómez et al. 2023; Lakhiar et al. 2024).

La conectividad emerge como otro eje importante. Aunque el Wi-Fi fue una tecnología que se repitió en los artículos analizados, su aplicabilidad en un contexto de amplias áreas rurales es limitada por su cobertura, el consumo energético que requieren y la necesidad de que exista una funcionalidad de la infraestructura local. Por el contrario, el LoRa o LoRaWAN se pueden presentar como alternativas más adecuadas para parcelas alejadas o redes de sensores distribuidos, debido a su largo alcance y a la menor demanda energética que requieren. No obstante, su adecuada aplicación sigue dependiendo del relieve, la densidad de nodos y la cantidad de gateways. De tal suerte que la opción de comunicación no debe interpretarse como un agente exterior sino como un recurso estructural del las condiciones de funcionamiento del sistema considerado (Meriç 2025; Sharma et al. 2025).

La sostenibilidad energética también adquiere un protagonismo central en la discusión. Un importante número de los trabajos revisados incluía alimentación solar, lo cual pone de manifiesto un interés por soluciones autónomas para monitorización y control continuos. A su vez, este aspecto es fundamental

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

cuando se combinan estaciones meteorológicas, nodos de IoT y válvulas de riego en situaciones con difícil acceso eléctrico. Avances recientes de estaciones agrometeorológicas solares de bajo coste y plataformas climáticas fotovoltaicas muestran que la autonomía energética es técnicamente posible, aunque debe, en cambio, valorarse la robustez a largo plazo, el mantenimiento de baterías y el funcionamiento en condiciones meteorológicas adversas (Di Gennaro et al., 2024).Desde el punto de vista científico, esta revisión pone de manifiesto un vacío claramente visible: hay un número elevado de estudios de desarrollo y validación inicial de tecnologías, pero escasean las evaluaciones longitudinales, multicampaña y multicultivo. En otras palabras, el área ha demostrado viabilidad desde el punto de vista tecnológico, pero requiere fortalecer la evidencia sobre estabilidad, durabilidad, total coste de propiedad y retorno agronómico en horizontes temporales más amplios. Asimismo, son escasos los estudios que directamente confrontan estaciones meteorológicas low-cost con instrumentación profesional en el marco de un mismo protocolo de campo. Las revisiones científicas recientes sobre IoT aplicado al riego y sensores inteligentes coinciden en que el siguiente salto del área no depende únicamente de añadir más inteligencia computacional, sino que depende de la consolidación de validaciones reproducibles y escalables (Abdelmoneim et al., 2025).

Otro vacío importante se refiere a la integración de capas analíticas avanzadas. A pesar de que la literatura reciente ha destacado el potencial del aprendizaje de máquina, la analítica predictiva y los sistemas de soporte a las decisiones, la mayoría de los estudios revisados aún emplean reglas deterministas o umbrales determinados manualmente, lo que significa que existe una brecha entre la retórica de la agricultura de precisión y la realidad práctica en el campo. De hecho, las revisiones de machine learning para el riego revelan oportunidades prometedoras junto con advertencias de limitaciones asociadas con la disponibilidad de datos, la calidad del entrenamiento, la interpretabilidad y la dependencia del contexto agronómico. En este sentido, la transición de los sistemas predictivos requeriría bases de datos más robustas, calibraciones locales y diseños que sean soberanamente algorítmicos pero a la vez operativamente viables (Sharma et al., 2025; Kumar et al., 2024).En cuanto al aporte para la agricultura de precisión, los resultados permiten afirmar que las estaciones meteorológicas de bajo coste pueden asumir esta función de manera muy adecuada y reconfiguran la generación de datos microclimáticos a escala local, cosa que es fundamental cuando la información de las estaciones oficiales es escasa o poco representativa de las condiciones de la parcela. La lógica de la precisión es precisamente la que apela a escalas de observación locales y la reciente literatura científica relacionada con los sensores y los datos inteligentes en agricultura apunta a mantener la determinación de la granularidad espacial y temporal del dato para optimizar recursos y responder a la variabilidad ambiental productiva (Soussi et al., 2024).

Finalmente, desde una mirada crítica, la revisión sugiere que el verdadero potencial de estos sistemas reside en su capacidad para articular tres dimensiones que, con frecuencia, son objeto de estudio separado: la accesibilidad económica, la calidad de la información agrometeorológica y la automatización de decisiones de riego. La mayoría de los trabajos se centra en la consecución de avances en 1 o en 2 de las dimensiones citadas, aunque pocos logran la completa articulación de las tres. Es por este motivo que las futuras investigaciones deben orientarse en el desarrollo de

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

sistemas que sean comparables, calibrables, energéticamente autónomos y evaluados en condiciones reales en el transcurso de ciclos productivos completos. Solo de este modo se podrá pasar a una fase predominantemente prototípica a una fase de amplia búsqueda y adopción en la agricultura de precisión (Kalaany et al., 2025).

CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática permitió analizar de manera integral el estado actual de los sistemas de riego controlados mediante estaciones meteorológicas de bajo costo en el contexto de la agricultura de precisión. A partir de la síntesis de 40 estudios publicados entre 2019 y 2025, se da cuenta de que estas tecnologías son una alternativa posible, accesible y sostenible para la optimización del uso del agua en los sistemas agrícolas. Por un lado, se da cuenta de que la acoplamientos entre estaciones meteorológicas y sistemas de riego automatizado favorece una toma de decisiones más precisa, basada en variables climáticas en tiempo real, lo que supera los riegos programados tradicionales, incorporación de la variabilidad ambiental y las necesidades específicas del cultivo, lo que mejora la eficiencia en el riego; por la otra parte, los resultados dan cuenta de que la utilización de tecnologías de bajo coste, especialmente de aquéllas que basan su aplicación sobre plataformas abiertas como microcontroladores y sensores asequibles, han conformado la democratización del riego inteligente, algo que es especialmente relevante en pequeños y medianos productores que pueden implementar sistemas de riego sin grandes inversiones en tecnologías de infraestructura. Respecto a la accesibilidad económica, los costos de implementación muy concretos reflejados en estudios específicos permiten especificar que la denominación de «bajo costo» debe entenderse en el contexto comparativo. En este sentido, Rocha et al. (2022) reportaron una estación meteorológica con un coste aproximado de 155 USD; Botero-Valencia et al. (2022) reportaron configuraciones de estaciones climáticas autónomas con costes de 511,78 USD y 564,51 USD según la tecnología de comunicación utilizada. Estos datos parecen mostrar que el concepto de bajo coste no se debe entender como el hecho de tener que utilizar equipos que cuesten menos de 100 USD, sino que depende en primer lugar de sus prestaciones, y en segundo lugar de las opciones comerciales disponibles. La accesibilidad económica varía también entre países y los tipos de productores: una inversión cercana a los 500 USD, aunque resulte competitiva con la instrumentación profesional, puede ser una barrera de adquisición para pequeños agricultores ecuatorianos. De ahí que la introducción de estas tecnologías en Ecuador, y su eventual pre-calificación como asequibles en el contexto local, debería considerar la capacidad de inversión del productor, los costos de mantenimiento, y los beneficios económicos derivados de quedarse con mayor ahorro de agua, etc.

Pero la propia revisión también pone de manifiesto limitaciones relevantes a tener en consideración, como son la variabilidad de la precisión de los sensores menos costosos, la necesidad de calibraciones de las mismas, la condición de los conectores o la falta de estandarización en el diseño y en las metodologías de evaluación, las cuales pueden generar riesgos en la confiabilidad y escalabilidad de los sistemas si no se toman correctamente en cuenta. Desde un punto de vista más tecnológico, los resultados ponen de manifiesto una evolución desde sistemas basados en umbrales a sistemas de predicción más complejos que combinan, pues, tanto las variables meteorológicas

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

como los modelos de evapotranspiración, y en menor grado, la agregación de algoritmos inteligentes. Si bien es cierto que el uso de enfoques predictivos todavía está un poco restringido, lo que sugiere que se fortalecerá la inclusión de inteligencia artificial y analítica de datos en investigaciones futuras; en términos de implicaciones prácticas, los sistemas analizados suponen una herramienta imprescindibles para avanzar hacia una agricultura más eficiente y sostenible, sobre todo en contextos afectados por la escasez hídrica. Su uso podría contribuir a optimizar el recurso agua, disminuir los costes y aumentar la productividad agrícola. Especialmente en regiones vulnerables al cambio climático, el seguimiento en tiempo real de los suelos y de las variables ambientales constituyen un ámbito clave para potenciar la resiliencia agrícola y mejorar la gestión y administración del recurso hídrico (Rhor Mancheno & Cazar-Ramirez, 2025). Finalmente, identifican algunas líneas de investigación en un futuro cercano. Así, sobresalen el desarrollo de sensores de bajo coste con mayor precisión, la validación de sistemas en condiciones reales a largo plazo, la estandarización de protocolos de evaluación, la integración con tecnologías emergentes como inteligencia artificial y sistemas satelitales o el diseño de soluciones adaptadas a distintos contextos agroecológicos. Afrontar tales desafíos permitirá consolidar el uso de estaciones meteorológicas de bajo coste como componentes estratégicos dentro de la agricultura de precisión.

Tabla 5.

Cumplimiento de la declaración PRISMA 2020

Ítem	Sección PRISMA	Descripción	Ubicación en el artículo
1	Título	Identificación como revisión sistemática	Título
2	Resumen	Resumen estructurado	Resumen
3	Introducción	Justificación del estudio	Introducción
4	Objetivos	Pregunta de investigación	2.2
5	Elegibilidad	Criterios de inclusión/exclusión	2.5 – 2.6
6	Fuentes	Bases de datos utilizadas	2.3
7	Búsqueda	Estrategia y ecuación	2.4
8	Selección	Proceso de selección	2.7
9	Datos	Extracción de datos	2.8
10	Calidad	Evaluación metodológica	2.9
11	Síntesis	Método de análisis	2.10
16	Resultados	Estudios incluidos	3.1
17	Características	Descripción de estudios	3.2
18	Resultados individuales	Hallazgos principales	3.3 – 3.7
20	Discusión	Interpretación de resultados	4

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Ítem	Sección PRISMA	Descripción	Ubicación en el artículo
23	Limitaciones	Limitaciones del estudio	3.8 – 4
24	Conclusiones	Implicaciones	5

Nota. *Elaboración propia con base en los ítems seleccionados de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021).*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aromataris, E., & Munn, Z. (Eds.). (2020). JBI manual for evidence synthesis. JBI. https://synthesismanual.jbi.global

Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. Sensors, 25(2), 343. https://doi.org/10.3390/s25020343

Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Elkamouh, A., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2024). Towards affordable precision irrigation: An experimental comparison of weather-based and soil water potential-based irrigation using low-cost IoT-tensiometers on drip irrigated lettuce. Sustainability, 16(1), 306. https://doi.org/10.3390/su16010306

Abdelli, A., Boujnah, W., Issa, K., Garrab, H., Nengroo, S., Machhout, M., & Lee, K. (2025). Field validated hybrid ESP-NOW and long range IoT monitoring system for energy autonomous precision agriculture. IEEE Access, 13, 207511–207526. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3641487

Arifjanov, A., Samiev, L., Jalilov, S., & Khushnudbek, S. (2025). Digital twin and IoT-based HYDRUS modeling approach for adaptive management of drip irrigation systems. Water Conservation & Management, 559–567. https://doi.org/10.26480/wcm.03.2025.559.567

Bali, N., & Chaudhary, D. (2026). Smart irrigation systems: A review of current trends and future prospects. En Hyperspectral Remote Sensing for Sustainable Agriculture (pp. 278–298). BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS.

Bernal, A., & Guarda, T. (2020). Information management as a determining factor in developing innovative public education policy strategies. Iberian Journal of Information Systems and Technologies, (E27), 35–48. https://core.ac.uk/download/pdf/487026121.pdf#page=35

Bernal Párraga, A. P., Baquez Chávez, A. L., Hidalgo Jaen, N. G., Mera Alay, N. A., & Velásquez Araujo, A. L. (2024). Pensamiento Computacional: Habilidad Primordial para la Nueva Era. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(2), 5177–5195. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10937

Bernal Párraga, A. P., Jaramillo Rodriguez, V. A., Correa Pardo, Y. C., Andrade Aviles, W. A., Cruz Gaibor, W. A., & Constante Olmedo, D. F. (2024). Metodologías Activas Innovadoras de Aprendizaje aplicadas al Medioambiente En Edades Tempranas desde el Área de Ciencias Naturales. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(4), 2892–2916. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12536

Botero-Valencia, J. S., Mejía-Herrera, M., & Pearce, J. M. (2022). Low cost climate station for smart

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

agriculture applications with photovoltaic energy and wireless communication. HardwareX, 11, e00296. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00296

Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, J. J. (2024). Soil Water Status Monitoring System with Proximal Low-Cost Sensors and LoRa Technology for Smart Water Irrigation in Woody Crops. Sensors, 24(24), 8104. https://doi.org/10.3390/s24248104

Di Gennaro, S. F., Cini, D., Berton, A., & Matese, A. (2024). Development of a low-cost smart irrigation system for sustainable water management in the Mediterranean region. Smart Agricultural Technology, 9, 100629. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100629

Hamami, L., & Nassereddine, B. (2020). Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 179, 105782. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105782

Hamouda, F., Puig-Sirera, À., Bonzi, L., Remorini, D., Massai, R., & Rallo, G. (2024). Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard. Agricultural Water Management, 305, 109138. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109138

Han, G., Wang, J., Arbuckle, J. G., & Zhong, J. (2026). Understanding the adoption of precision agriculture technologies by farmers in China: Insights from the unified theory of acceptance and use of technology. Agricultural Systems, 231(104549), 104549. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104549

Hilton, M. (2024). JBI critical appraisal checklist for systematic reviews and research syntheses (product review). Journal of the Canadian Health Libraries Association / Journal de l'Association des bibliothèques de la santé du Canada, 45(3). https://doi.org/10.29173/jchla29801

Kalaany, C. M. A., Kimaita, H. N., Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). The Potential of Low-Cost IoT-Enabled Agrometeorological Stations: A Systematic Review. Sensors, 25(19), 6020. https://doi.org/10.3390/s25196020

Karar, M. E., Alotaibi, F., Al Rasheed, A., & Reyad, O. (2021). A pilot study of smart agricultural irrigation using unmanned aerial vehicles and IoT-based cloud system. Information Sciences Letters, 10(1), 131–140. https://doi.org/10.18576/isl/100115

Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. Smart Agricultural Technology, 8, 100487. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487

Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., Syed, T. N., Chauhdary, J. N., & Rakibuzzaman, M. (2024). A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. Agriculture, 14(7), 1141. https://doi.org/10.3390/agriculture14071141

Lupercio Novillo, G., Macancela, A., Tacuri, E., & Lupercio, L. (2022). Estación meteorológica inteligente para control de riego y mitigación de heladas. Revista Tecnológica ESPOL, 34(3), 46–57. https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.948

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 82-107

Meriç, M. K. (2025). Implementation of a wireless sensor network for irrigation management in drip irrigation systems. Scientific Reports, 15, Article 14157. https://doi.org/10.1038/s41598-025-97303-w

Mokhtarzadeh, H., Gorjian, S., & Minaei, S. (2025). Design, development, and evaluation of a low-cost smart solar-powered weather station for use in agricultural environments. Results in Engineering, 26, 104848. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104848

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks. Sensors, 20(12), 3585. https://doi.org/10.3390/s20123585

Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., & Koffel, J. B. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. Systematic Reviews, 10, 39. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z

Rhor Mancheno, J. S., & Cazar-Ramirez, D. (2025). Hacia una agricultura resiliente al cambio climático: Sistemas de riego inteligente y monitoreo de humedad del suelo para cultivos en la zona andina. Avances en Ciencias e Ingenierías, 17(1), e3299. https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299

Sánchez-Sutil, F., & Cano-Ortega, A. (2021). Smart control and energy efficiency in irrigation systems using LoRaWAN. Sensors, 21(21), 7041. https://doi.org/10.3390/s21217041

Sharma, V., Kaur, G., Sreethu, S. 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

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. Sensors, 24(8), 2647. https://doi.org/10.3390/s24082647

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

Xu, J., Gu, B., & Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. Artificial Intelligence in Agriculture, 6, 10–22. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001