

GESTIÓN DEL AGUA EN LA AGRICULTURA: *La revolución digital para un futuro sostenible*

La agricultura se enfrenta a una crisis hídrica global sin precedentes, agravada por el cambio climático. Las tecnologías digitales como la teledetección, la inteligencia artificial o el internet de las cosas emergen como herramientas clave para transformar la gestión del agua, optimizar el riego y garantizar la sostenibilidad del sector.

PARRA-LÓPEZ, C.*; BEN ABDALLAH, S.; GARCIA-GARCIA, G.; HASSOUN, A.; TROLLMAN, H.; JAGTAP, S.; GUPTA, S.; AÏT-KADDOUR, A.; MAKMUANG, S.; CARMONA-TORRES, C.

*Área de Economía de la Cadena Alimentaria. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA)

El agua es el recurso más valioso para la agricultura y, sin embargo, su disponibilidad está cada vez más amenazada. A nivel mundial, el sector agrícola consume aproximadamente el 70% del agua dulce disponible (Ridoutt *et al.*, 2021), una cifra que pone de manifiesto su papel central en la gestión hídrica global. Este desafío se intensifica por el crecimiento de la población, que alcanzará casi los 10.000 millones de personas en 2050 (United Nations, 2022), y los efectos cada vez más evidentes del cambio climático, que alteran los patrones de lluvia y aumentan la frecuencia de sequías e inundaciones.

En este contexto, la ineficiencia en el uso del agua ya no es una opción. Prácticas de riego obsoletas o una gestión deficiente de los recursos hídricos no solo desperdician un bien escaso, sino que también contribuyen a la degradación de la calidad del agua y del suelo. La respuesta a esta encrucijada se encuentra en la innovación. La "Agricultura 4.0", o agricultura digital, representa un cambio de paradigma

que integra tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad.

Este artículo explora cómo herramientas como la teledetección, la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT) y el *big data* están revolucionando el uso y la gestión del agua en la agricultura, ofreciendo soluciones concretas a los desafíos más apremiantes del sector.

Los grandes desafíos del agua en el campo

Para comprender el potencial de la revolución digital, primero debemos analizar los cuatro grandes retos a los que se enfrenta la gestión del agua en la agricultura moderna (Tabla 1):

1. Escasez hídrica: Es el problema más visible. Afecta a casi dos tercios de la población mundial, con cuatro mil millones de personas sufriendo escasez severa al menos un mes al año (Mekonnen y Hoekstra, 2016). En agricultura, esta escasez puede ser de tres tipos:
 - a. Escasez de agua verde: Se refiere a la insuficiencia de agua de llu-

via y humedad en el suelo para satisfacer las necesidades de los cultivos de secano.

- b. Escasez de agua azul: Ocurre cuando no hay suficiente agua disponible en ríos, lagos y acuíferos para cubrir las demandas del riego de forma sostenible.
 - c. Escasez económica: Se produce cuando, a pesar de existir recursos hídricos, faltan las infraestructuras o la inversión necesarias para movilizarlos.
2. Contaminación y degradación de la calidad: La agricultura no solo consume agua, sino que también puede ser una fuente importante de contaminación. El uso de fertilizantes y pesticidas, así como los residuos de la ganadería intensiva, pueden transferir contaminantes a los cuerpos de agua (Mateo-Sagasta *et al.*, 2017). Esta contaminación reduce la disponibilidad de agua segura para la agricultura y otros usos, y daña los ecosistemas acuáticos.
 3. Uso ineficiente: En muchas partes del mundo, una cantidad significativa de agua se pierde debido a prácticas de riego ineficientes. Esto



se traduce en una baja productividad del agua, es decir, se obtiene un menor rendimiento agrícola por cada metro cúbico de agua. Mejorar la eficiencia es fundamental para producir más con menos agua, un objetivo clave para la seguridad alimentaria.

4. El impacto del cambio climático: El cambio climático actúa como un “multiplicador de crisis” para el agua. Altera los patrones de precipitación, intensifica las sequías en regiones como el Mediterráneo y aumenta el riesgo de inundaciones en otras (Iglesias y Garrote, 2015). Estos eventos extremos amenazan tanto la cantidad como la calidad del agua disponible para la agricultura.

La respuesta digital: Tecnologías para una gestión inteligente

Frente a estos desafíos, la agricultura digital ofrece un arsenal de herramientas innovadoras. Cada tecnología aporta soluciones específicas que, combinadas, pueden transformar radicalmente la gestión del agua. La **Tabla 2** resume las principales tecno-

TABLA 1
Resumen de los grandes retos del agua en el campo.

DESAFÍO PRINCIPAL	DESCRIPCIÓN Y CONSECUENCIAS CLAVE
Escasez hídrica	Insuficiencia de agua de lluvia (verde), superficial/subterránea (azul) o falta de infraestructura para acceder a ella (económica). Afecta a la viabilidad de los cultivos y la seguridad alimentaria.
Contaminación	El uso de agroquímicos y los residuos ganaderos degradan la calidad del agua, reduciendo su disponibilidad para usos agrícolas y dañando los ecosistemas acuáticos.
Uso ineficiente	Prácticas de riego obsoletas que provocan pérdidas de agua, resultando en una baja productividad hídrica (menos cultivo por cada gota de agua utilizada).
Impacto del cambio climático	Actúa como un “multiplicador de crisis”, alterando los patrones de lluvia y aumentando la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones, lo que amenaza la disponibilidad y calidad del agua.

logías digitales y sus aplicaciones más destacadas en la gestión del agua, las cuales se detallan más abajo.

Teledetección

La teledetección utiliza satélites, aviones o drones para recopilar datos de los campos de cultivo sin contacto físico. Permite obtener información sobre la salud de los cultivos, las condiciones del suelo y los niveles de humedad a diferentes escalas. Algunas aplicaciones clave incluyen:

- Optimización del riego: Los drones y satélites pueden generar mapas de humedad del suelo de alta resolución. Estos mapas permiten a los agricultores identificar qué zonas del campo necesitan agua y cuánta, evitando tanto el riego excesivo como el deficitario. Esto no solo ahorra agua, sino que mejora el rendimiento de los cultivos (Awais *et al.*, 2022).
- Estimación de las necesidades hídricas: Combinando datos de microondas y ópticos, es posible estimar con

gran precisión los requerimientos de agua para el riego, mejorando la eficiencia y la productividad agrícola (Dari *et al.*, 2021).

- Evaluación de la sequía: Los drones equipados con cámaras multiespectrales y térmicas pueden monitorizar el estrés hídrico de los cultivos, permitiendo implementar estrategias de mitigación de la sequía de forma proactiva (Cheng *et al.*, 2023).

Internet de las cosas (IoT)

El IoT es una red de dispositivos físicos (sensores, actuadores) conectados a internet que recopilan e intercambian datos en tiempo real. En agricultura, convierte el campo en un entorno inteligente y conectado. Algunas aplicaciones clave son:

- Monitorización en tiempo real: Sensores de bajo coste desplegados en el campo miden continuamente la humedad del suelo, la temperatura y la calidad del agua. Estos datos se envían a la nube, donde pueden ser analizados para tomar decisiones inmediatas (Bhardwaj *et al.*, 2022).
- Detección de fugas: Sensores instalados en las tuberías de riego pueden detectar fugas de forma temprana, evitando el desperdicio de agua y daños en la infraestructura (Mohd Yussof y Ho, 2022).
- Reutilización del agua: El IoT facilita la creación de sistemas de recirculación de agua en invernaderos, optimizando el uso de recursos y reduciendo los vertidos contaminantes (Zia, 2022).

Inteligencia artificial (IA)

La IA se basa en algoritmos que permiten a las máquinas aprender de los datos y tomar decisiones. En la gestión del agua, la IA actúa como el “cerebro” que analiza la información recopilada por otras tecnologías. Algunas aplicaciones clave incluyen:

- Predicción y gestión de recursos: Los modelos de IA pueden predecir los niveles de los acuíferos o los patrones de recarga de agua subterránea bajo diferentes escenarios climáticos, ayu-

TABLA 2
Resumen de tecnologías digitales para una gestión inteligente del agua.

TECNOLOGÍA DIGITAL	APLICACIONES CLAVE EN LA GESTIÓN DEL AGUA
Teledetección	• Optimización del riego mediante mapas de humedad. • Estimación precisa de las necesidades hídricas de los cultivos. • Monitorización y evaluación proactiva de la sequía.
Internet de las cosas (IoT)	• Monitorización en tiempo real de la humedad del suelo y calidad del agua. • Detección temprana de fugas en sistemas de riego. • Automatización de sistemas de reutilización de agua.
Inteligencia artificial (IA)	• Predicción de niveles de acuíferos y patrones de recarga. • Creación de sistemas de riego inteligentes y automáticos. • Detección y predicción de la contaminación del agua.
Big data	• Implementación de riego de ultra-precisión. • Predicción de la demanda y disponibilidad de agua a nivel de cuenca.
Robótica	• Riego y monitorización automatizados. • Evaluación del estado hídrico de los cultivos con alta precisión. • Detección eficiente de fugas en tuberías.
Sensores inteligentes	• Control automatizado del riego basado en umbrales críticos. • Creación de sistemas de gestión integrados y adaptativos.
Blockchain	• Gestión transparente y segura de los derechos de agua. • Gobernanza comunitaria y reparto equitativo del riego. • Creación de registros auditables del consumo de agua.

dando a una planificación sostenible (Banerjee *et al.*, 2024).

- Riego inteligente: La IA, combinada con el IoT, permite crear sistemas de riego que no solo monitorizan las condiciones del campo, sino que también controlan automáticamente las bombas y los sistemas de pulverización para aplicar la cantidad justa de agua en el momento preciso (Al Mashhadany *et al.*, 2024).
- Calidad del agua: Se pueden utilizar algoritmos de IA para predecir la calidad del agua subterránea, identificar la contaminación por metales pesados en los suelos y optimizar las redes de monitoreo, garantizando un uso seguro del agua en la agricultura (Abbas *et al.*, 2024; Taşan *et al.*, 2024).

Big data (BD)

El *Big Data* se refiere al análisis de enormes volúmenes de datos generados por sensores, drones, satélites y maquinaria agrícola. Su poder reside en la capacidad de encontrar patrones y tendencias que no son visibles a simple vista. Algunas aplicaciones clave son:

- Riego de precisión: Al analizar datos históricos y en tiempo real sobre el clima, el suelo y los cultivos, el *big*

data analytics (BDA) permite implementar estrategias de riego de ultra-precisión, aplicando el agua necesaria en cada punto del campo y minimizando la escorrentía (Jaber *et al.*, 2022).

- Predicción de la demanda: El BDA ayuda a predecir con mayor exactitud la disponibilidad y la demanda de agua, lo que permite una gestión más sostenible de los recursos hídricos a nivel de cuenca (Mekruksavanich y Cheosuwan, 2018).

Robótica

Los robots agrícolas automatizan tareas repetitivas con gran precisión. Aunque su aplicación principal no siempre es el agua, muchas de sus funciones tienen un impacto directo en su gestión. Algunas aplicaciones clave incluyen:

- Riego y monitorización automatizados: Robots terrestres pueden monitorizar la temperatura y humedad del suelo y regar los cultivos de forma automática según las previsiones meteorológicas y las necesidades de la planta (Wu *et al.*, 2020).
- Evaluación del estado hídrico: Robots equipados con radiómetros térmicos infrarrojos pueden evaluar el estado hídrico de los cultivos, per-

mitiendo un riego de alta precisión (Fernández-Novales *et al.*, 2021).

- **Detección de fugas:** Robots y drones con cámaras térmicas y de luz visible pueden detectar fugas en sistemas de riego por goteo de manera mucho más rápida y eficiente que la inspección manual (Türkler *et al.*, 2023).

Sensores inteligentes

Son dispositivos que no solo miden parámetros físicos (humedad, temperatura), sino que también tienen capacidades de procesamiento integradas. Son la base del IoT y de la agricultura de precisión. Algunas aplicaciones clave son:

- **Control del riego:** Plataformas de código abierto integran sensores de suelo y atmosféricos que alertan a los agricultores cuando la humedad del suelo cae por debajo de umbrales críticos, ayudando a usar el agua

de manera eficiente (Tzerakis *et al.*, 2023).

- **Sistemas integrados:** Combinados con dispositivos integrados y computación en la nube, los sensores inteligentes permiten crear sistemas de gestión del agua seguros y eficientes que responden automáticamente a las condiciones meteorológicas (Bhardwaj *et al.*, 2022).

Blockchain

Es una tecnología de registro distribuido que permite compartir datos de forma segura, transparente e inmutable. Aunque es una de las tecnologías menos integradas en agricultura, su potencial para la gobernanza del agua es enorme. Algunas aplicaciones clave son:

- **Gestión de derechos de agua:** El blockchain puede utilizarse para crear plataformas de comercio de derechos de agua más eficientes y

transparentes, reduciendo los costes de transacción (Liu y Shang, 2022).

- **Gobernanza comunitaria:** En comunidades de regantes, puede automatizar la gestión del riego, aumentando la confianza entre los usuarios y facilitando el reparto equitativo de un recurso compartido (Bordel *et al.*, 2019).
- **Colaboración y transparencia:** Facilita la colaboración entre gobiernos, proveedores de servicios y agricultores para ahorrar agua, creando un registro fiable y auditable del consumo (Cao *et al.*, 2024).

Desafíos y oportunidades para la agricultura del futuro

A pesar del enorme potencial de estas tecnologías, su adopción generalizada se enfrenta a importantes barreras. Superarlas es el gran reto para materializar la promesa de la agricultura digital.



info@molecor.com | www.molecor.com

Tuberías y accesorios de PVC-O de la máxima calidad

TR6

El primer tubo de PVC-O PN6, destinado a riego

La mejor alternativa para el transporte de agua a presión

Soluciones eficientes y respetuosas con el medio ambiente



Propiedades físicas y mecánicas imbatibles

ECO FITTOM

Desde DN90 hasta DN1200

TOM

Las menores emisiones de CO₂ a la atmósfera



CONCLUSIÓN: UN CAMINO HACIA LA RESILIENCIA HÍDRICA

La gestión del agua en la agricultura se encuentra en un punto de inflexión. Los desafíos son inmensos, pero las herramientas para afrontarlos son más poderosas que nunca. Las tecnologías digitales ofrecen un potencial transformador para crear sistemas agrícolas más productivos, resilientes y sostenibles.

Sin embargo, la tecnología por sí sola no es suficiente. Su éxito dependerá de un enfoque holístico que considere los factores económicos, sociales y ambientales. Es necesario un esfuerzo concertado de agricultores, industria, investigadores y responsables políticos para superar las barreras de adopción y garantizar que los beneficios de la revolución digital lleguen a todos. Realizar este potencial no es solo una oportunidad, sino una necesidad para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de nuestros recursos hídricos en un mundo en constante cambio.

- Principales desafíos

- Costes y acceso: La implementación de estas tecnologías puede ser costosa, especialmente para los pequeños agricultores. La falta de infraestructura y conectividad en zonas rurales agrava este problema (Wanyama *et al.*, 2024).
- Falta de conocimientos técnicos: El uso eficaz de estas tecnologías requiere conocimientos especializados que no siempre están al alcance de los agricultores. La complejidad de las herramientas puede generar desconfianza y resistencia a la adopción (Benameur *et al.*, 2024).
- Gestión de datos, privacidad y ciberseguridad: La agricultura digital genera una cantidad masiva de datos. Gestionarlos, garantizar su calidad, proteger la privacidad y asegurar los sistemas contra ciberataques son desafíos críticos (Salim *et al.*, 2020).
- Impacto ambiental de la propia tecnología: El consumo de energía de los centros de datos y la generación de residuos electrónicos son preocupaciones emergentes que deben abordarse para garantizar que la solución no cree un nuevo problema (He *et al.*, 2024).

- Oportunidades de futuro:

- Sistemas integrados: La mayor oportunidad reside en combinar múltiples tecnologías. Por ejemplo, sensores IoT que recogen datos, una IA que los analiza para predecir las necesidades de riego y un robot que ejecuta la acción de forma automática.
- Accesibilidad y asequibilidad: Es prioritario desarrollar soluciones de bajo coste y fáciles de usar, adaptadas a las necesidades de los pequeños agricultores. Los modelos de servicios compartidos, donde varios agricultores comparten el coste de un dron o un servicio de análisis de datos, son una vía prometedora.
- Mejora de la calidad del agua: La investigación futura debe centrarse no solo en la cantidad, sino también en la calidad del agua, desarrollando sensores más sofisticados para detectar contaminantes y algoritmos de IA para predecir y mitigar los riesgos de polución.
- Políticas de apoyo y formación: Es fundamental que las administraciones públicas creen marcos regulatorios que incentiven la adopción de estas tecnologías y promuevan programas de formación y extensión agraria para capacitar a los agricultores.

NOTA: El presente artículo se basa en el artículo científico de los mismos autores: Parra-López, C.; Ben Abdallah, S.; Garcia-Garcia, G.; Hassoun, A.; Trollman, H.; Jagtap, S.; Gupta, S.; Ait-Kaddour, A.; Makmuang, S.; Carmona-Torres, C. (2025). "Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook". *Agricultural Water Management*, 309: 109347. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109347>. Consultar para más detalles y las referencias bibliográficas.

Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: redaccion@editorialagricola.com