



**Ponencia:**

**Inteligencia artificial: una oportunidad para el regadío de aguas superficiales y subterráneas**

**Autor:**

**Emilio Camacho Poyato, Catedrático de Ingeniería Hidráulica. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba**

# **Inteligencia artificial: una oportunidad para el regadío de aguas superficiales y subterráneas**

**Emilio Camacho Poyato.** Catedrático de Ingeniería Hidráulica. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba

## INDICE

1. <i>Introducción</i> .....	2
2. <i>Contexto y desafíos actuales del regadío</i> .....	3
2.1    Recursos hídricos en España .....	4
2.2    La modernización del regadío .....	5
2.3    Nexo agua-energía.....	7
3. <i>Etapas en la evolución del riego</i> .....	8
4. <i>Fundamentos de la Inteligencia Artificial Aplicada al Agua</i> .....	10
5. <i>Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la gestión del agua</i> .....	12
5.1    Aplicaciones de la IA en la gestión del agua superficial .....	12
5.2    Aplicaciones de la IA en la gestión de aguas subterráneas .....	13
6. <i>Tecnologías Inteligentes para un riego sostenible</i> .....	13
6.1    Sensores.....	14
6.1.1    Sensores de planta .....	14
6.1.2    Sensores de suelo.....	16
6.1.3    Sensores climáticos .....	17
6.1.4    Sensores hidráulicos para monitorizar el riego .....	18
6.2    Sensores remotos .....	19
6.3    Gemelos digitales.....	21
6.4    Modelos de aprendizaje profundo (Deep Learning) .....	23
7. <i>Adopción de la tecnología en el regadío</i> .....	24
8. <i>Casos de uso</i> .....	28
8.1    Riego de precisión .....	29
8.2    Gemelo Digital para un riego .....	30
8.3    Gemelo Digital en una estación de bombeo.....	33
8.4    Modelo predictivo de demanda de agua .....	35
9. <i>Conclusiones</i> .....	38
10. <i>Referencias</i> .....	39

## 1. Introducción

El agua es un recurso natural básico para el desarrollo económico y social, así como para el mantenimiento de los ecosistemas. Existe una gran incertidumbre en cuanto a la disponibilidad de este recurso para satisfacer las demandas futuras de agua requeridas en la producción de alimentos, energía, usos humanos y a su vez mantener las condiciones ambientales.

En un contexto marcado por el cambio climático, el crecimiento de la población y la intensificación agrícola, la escasez de agua amenaza la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible de numerosas regiones. En zonas donde la agricultura depende del riego y de recursos hídricos superficiales (ríos, embalses) y subterráneos (acuíferos), la eficiencia en el uso del agua es esencial. Por otra parte, la elevada productividad del regadío en España explica que, con tan solo el 16% de la superficie agraria útil (3,8 Mha) (ESYRCE, 2024), produzca el 64% de la producción vegetal y que sea, por tanto, un sector estratégico en la producción agrícola. Además, la agricultura en general representa un 2.5 % de PIB nacional y gran parte de ese valor se debe a la agricultura de regadío (aproximadamente un 70 %). Otro dato que viene a resaltar la importancia económica del regadío es la magnitud de la agricultura en las exportaciones. España es el 4 país de la UE con mayores exportaciones y la región de Andalucía es la primera de todas las regiones de la UE (Eurostat 2025)

En este escenario, la inteligencia artificial (IA) surge como una herramienta disruptiva capaz de transformar radicalmente la gestión de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos. Esta herramienta ofrece soluciones innovadoras para optimizar el uso del agua, reducir costes operativos, minimizar el impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura de regadío.

Sin embargo, la concepción tradicional de la IA como una herramienta puramente analítica está quedando obsoleta. Nos encontramos inmersos en una transición tecnológica sin precedentes: el paso de sistemas de soporte a la decisión a sistemas de actuación autónoma. Este fenómeno, conocido como procesos de AGENTILIZACIÓN, marca el tránsito definitivo de la mera información a la actuación directa. Ya no basta con que un algoritmo nos diga que al cultivo le falta agua; los nuevos sistemas, constituidos por constelaciones de agentes, tienen la capacidad de percibir, razonar y ejecutar acciones físicas (como la apertura de válvulas o la regulación de bombas) de manera autónoma y coordinada.

La IA en la agricultura ha generado aplicaciones que aportan a los agricultores asesoramiento preciso sobre la gestión del agua, la rotación de cultivos, la programación de la campaña, la siembra óptima y otros aspectos. Mediante algoritmos de aprendizaje automático e imágenes satélites y drones, podemos evaluar la sostenibilidad agrícola, gestionar la nutrición y predecir el clima. Al utilizar datos precisos, la agricultura de precisión maximiza la producción agrícola. Mediante dispositivos móviles y software de IA, los agricultores pueden obtener un

plan agrícola personalizado. Si bien la intervención humana siempre será necesaria para el diseño, la aplicación de la IA puede reducir significativamente el trabajo.

Mediante la automatización, la robótica y la inteligencia artificial, el futuro de la horticultura se está transformando. Los agricultores pueden utilizar el aprendizaje automático para identificar posibles enfermedades y parásitos en las plantas.

Hay que tener en cuenta que la agricultura juega un papel fundamental en la alimentación de una población en continua expansión. Los efectos del cambio climático es algo con lo que tienen que enfrentarse y se debe asegurar de que los alimentos se cultiven de forma sostenible. Para tomar las mejores decisiones económicas, ambientales y legales, se deben considerar diversos requisitos y factores. Aquí es donde la agricultura digital podría ser útil (Zhang, 2020; Kumar et al., 2021; Kaur, 2019).

Otro factor que hay que considerar es la Política Agraria Común la cual incorpora estrategias de digitalización y describe cómo las tecnologías digitales se usarán en la agricultura y en las zonas rurales. Esto en consonancia con la estrategia de la UE en el denominado Pacto Verde donde se tiene en cuenta que todos los sectores económicos han de seguir por el camino de la transición digital y la sostenibilidad.

## 2. Contexto y desafíos actuales del regadío

La superficie de riego en España ha tenido un crecimiento constante desde los años 50 (figura 1). Este aumento ha sido en la misma proporción en los últimos 25 años, periodo en el que se ha producido la gran modernización del regadío, por lo que no debe achacarse a la modernización el efecto rebote que en algunos casos le atribuyen.

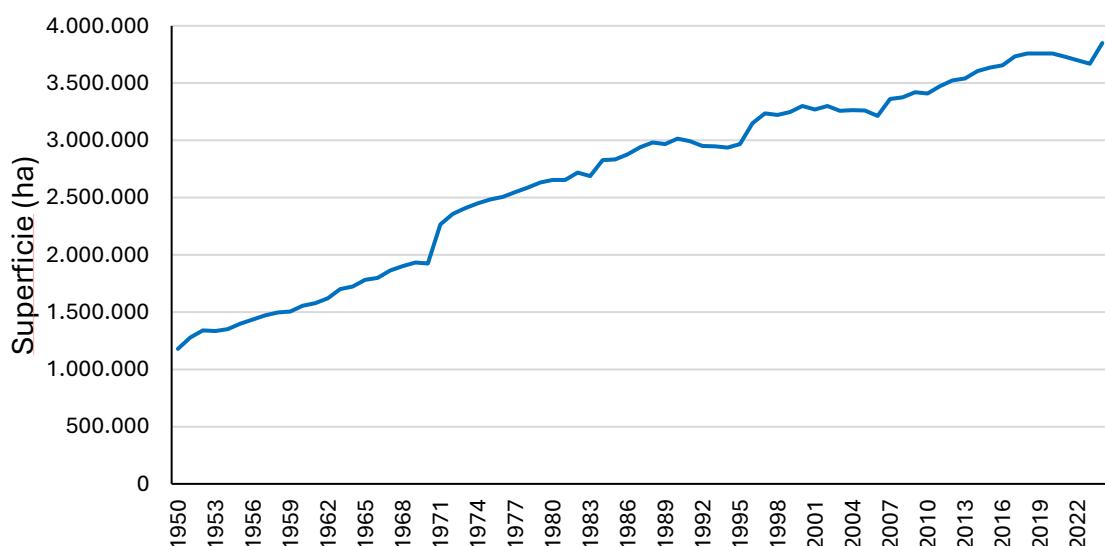


Figura 1. Evolución de la superficie de riego en España

No obstante, el sector del regadío debe hacer frente a diversos desafíos ante los cuales los avances tecnológicos se presentan como una herramienta eficaz. Entre ellos cabe citar una escasez hídrica debido a sequías cíclicas y recurrentes que afectan a la disponibilidad de los recursos hídricos, una sobreexplotación de acuíferos y una merma de calidad de estos, los elevados costes energéticos que han aumentado más de un 600 % respecto a los regadíos de 1980, el cambio climático que ha alterado los patrones de lluvias y ha aumentado los eventos extremos en intensidad y frecuencia.

## 2.1 Recursos hídricos en España

No sería posible una agricultura de regadío sin unas infraestructuras hidráulicas adecuadas. La distribución de precipitaciones irregular a lo largo del año requiere que se disponga de buena capacidad de almacenamiento para poder satisfacer las demandas de riego. En España la evolución de esta capacidad de recursos ha ido aumentando con el tiempo, ver figura 2.

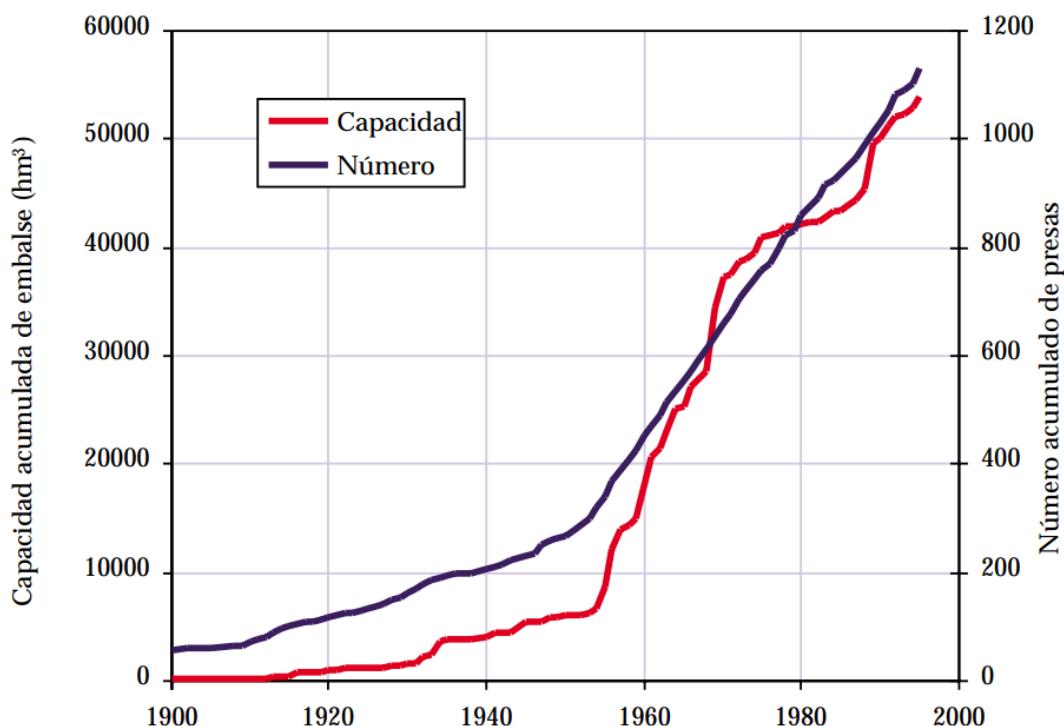


Figura 2. Evolución de la capacidad de almacenamiento en España

En la actualidad, la capacidad total de los embalses españoles es de aproximadamente 56.041 hm<sup>3</sup>, de los cuales 38.796 hm<sup>3</sup> corresponden a embalses de uso consuntivo y 17.245 hm<sup>3</sup> a embalses hidroeléctricos. El ritmo de aumento de la capacidad se ha ralentizado en las últimas décadas, considerándose que las posibilidades de incrementarla significativamente están casi agotadas en algunas cuencas.

La evolución ha tenido un crecimiento exponencial en el número y tamaño de las presas, concentrándose la mayor parte del almacenamiento en aproximadamente 300 embalses grandes con capacidades superiores a 10 hm<sup>3</sup>.

Para gestionar esta capacidad finita en un entorno de incertidumbre climática, es necesario trascender los silos de información actuales. La tendencia más avanzada es la incorporación de espacios de datos federados. A diferencia de las bases de datos centralizadas tradicionales, los espacios federados permiten que distintas entidades (comunidades de regantes, confederaciones hidrográficas, empresas agrotech) comparten inteligencia sin necesariamente ceder la soberanía de sus datos brutos. Mediante técnicas de Federated Learning (Aprendizaje Federado), los algoritmos pueden entrenarse en nodos locales aprendiendo, por ejemplo, patrones de consumo o recarga de acuíferos específicos y compartir solo los pesos del modelo matemático, garantizando la privacidad y la seguridad.

Esta arquitectura permite entrenar modelos mixtos incorporando modelos dinámicos, multivariantes y series temporales. Al federar datos de miles de sensores de humedad, caudalímetros y estaciones meteorológicas dispersas, se logran modelos robustos capaces de generalizar predicciones de demanda hídrica con una precisión que ningún actor individual podría alcanzar por sí solo.

## 2.2 La modernización del regadío

El concepto de modernización ha ido evolucionando. Inicialmente, la modernización del regadío se entendía como la ejecución y mejora de infraestructuras y equipamientos de las zonas regables, es decir una actualización técnica. Posteriormente, se ha puesto de manifiesto la necesidad de ligar la modernización de un regadío con la mejora de su gestión. Para ello, se deben implementar sistemas de control, automatización y asesoramiento especializado. Esta etapa constituye la segunda modernización (Camacho et al., 2017). La gestión, la incorporación de digitalización y sobre todo el asesoramiento y la formación son aún tareas pendientes, en muchos casos, y requieren de una pronta ejecución.

La modernización en su conjunto consiste en actuaciones más complejas, pues implican cambios fundamentales, tanto en la gestión del agua, como en las infraestructuras. Por tanto, una modernización se puede definir como una actualización técnica y de manejo de las zonas regables que tiene como objetivos mejorar el uso de los recursos (agua, energía, mano de obra, financieros, ambientales etc.) y, sobre todo, distribuir y repartir el agua a los usuarios con criterios de calidad en el servicio. Pero cabe realizarse la siguiente pregunta: ¿por qué ha sido importante la modernización de regadíos? La respuesta es clara: en nuestras condiciones climáticas, donde el recurso agua es escaso, es muy importante tener un buen manejo, ya que la competitividad por dicho recurso es y será cada vez mayor. Pero es relevante saber que la modernización no es una acción simple, sino que requiere tanto de cambios estructurales como de manejo. Por ello, es importante dar un buen servicio de reparto de agua a los usuarios y, aunque esto no implica necesariamente el uso de equipos sofisticados, es esencial el conocimiento de las opciones más apropiadas para cada caso.

Con todo ello podemos decir que la modernización del riego ha sido una de las actuaciones más importante en el regadío español y ha cambiado y transformado el mismo, prueba de ello es el efecto que ha tenido en los sistemas de riego donde se ha pasado de un riego por superficie mayoritario en los años 90 a un riego localizado mayoritario en la actualidad (figura 3).

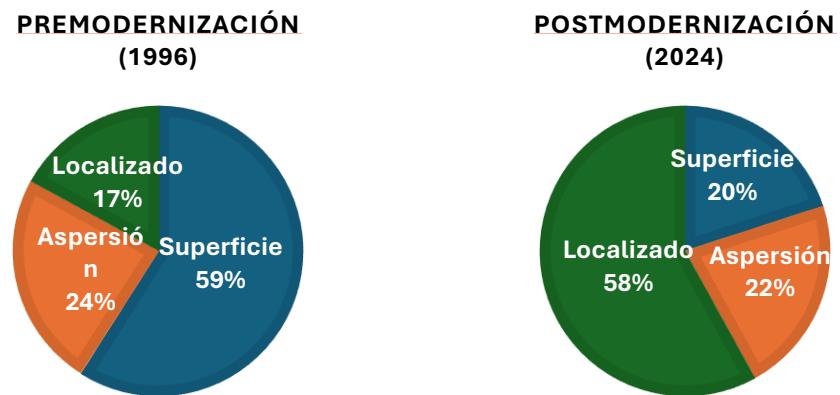
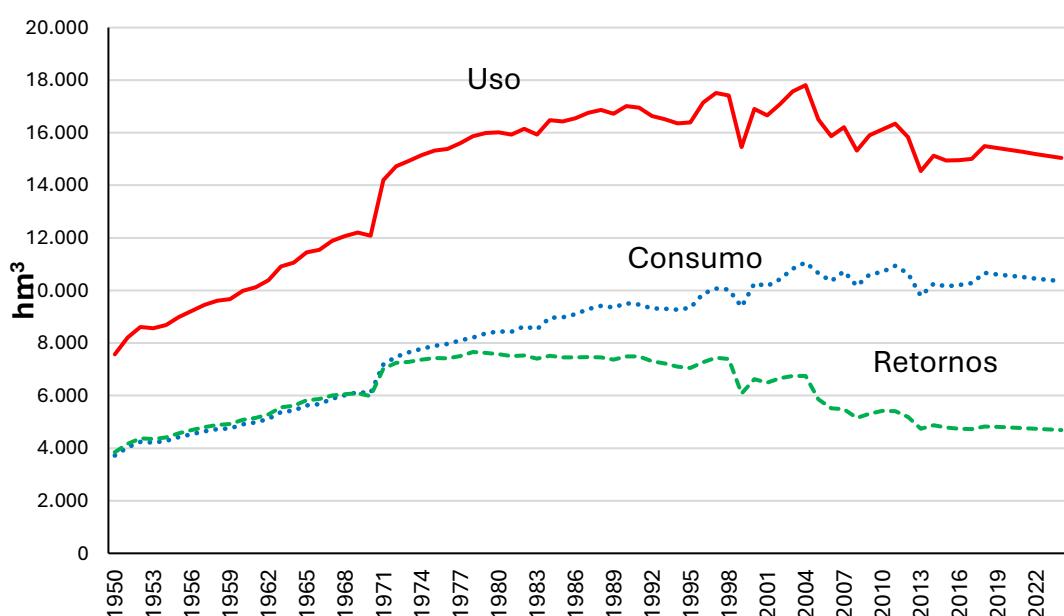


Figura 3. Métodos de riego antes de la modernización y después de la modernización

FUENTE: ESYRCE (2024)

Unos de los efectos importantes que ha provocado la modernización ha sido la reducción de la demanda de agua. En la figura 4 podemos ver cómo, aunque el agua consumida no ha cambiado de forma significativa, es decir el agua que requieren los cultivos, sí que lo ha hecho el agua usada, en torno a un 20-30 %, debido al aumento de la eficiencia global en la modernización. Los retornos de agua también han disminuido. Por tanto, el ahorro de agua que conlleva un menor uso es agua que se queda en el embalse. Aunque la superficie regada ha aumentado ello no ha provocado un aumento de las extracciones (desde 2004 se reducen). La dotación media en España ha descendido desde 590 mm en 1985 a 390 mm en 2025 (Berbel et al, 2025).



#### Figura 4. Evolución de volúmenes de agua usada, consumida y retornos

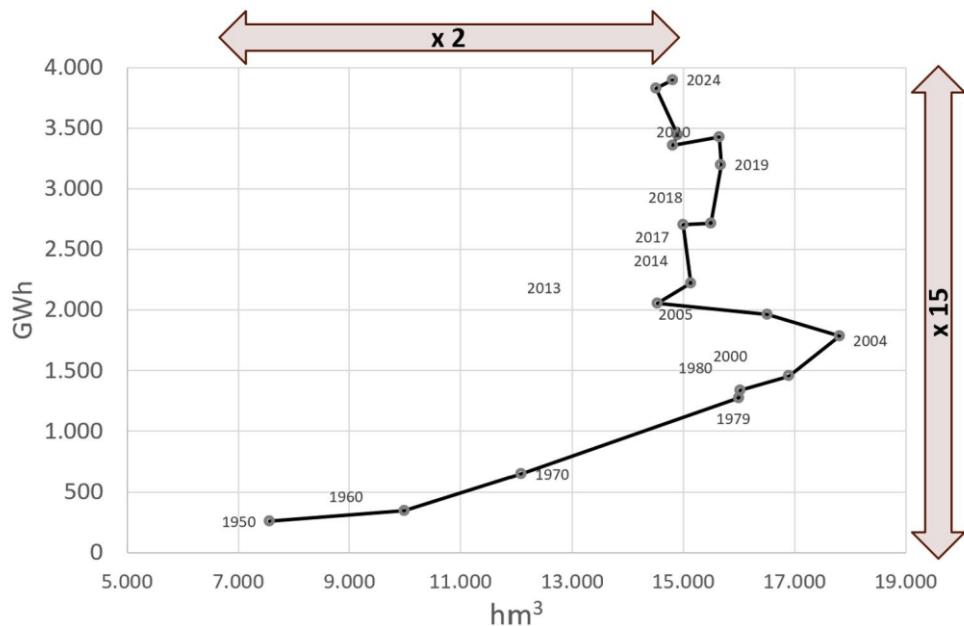
Pero consciente de la importancia que un regadío modernizado tiene en la mejora de la eficiencia del agua y la energía y teniendo en cuenta los avances tecnológicos propios de la era digital en la que nos encontramos hoy, el regadío español se encuentra en otra etapa de actualización tecnológica y por tanto modernización. Aquí es donde los fondos procedentes del Plan de Transformación Digital y Transferencia (PERTE del ciclo del agua) establece como objetivo incentivar el desarrollo de la digitalización de las comunidades de usuarios de agua para regadío a través de mejorar el conocimiento de los usos del agua y de la transparencia en la gestión administrativa del agua, mejorar la gestión del agua en las explotaciones y el conocimiento de las pérdidas de agua en las explotaciones de regadío, mejorar el empleo de fertilizantes y plaguicidas y disminuir los impactos de su aplicación sobre el ciclo hidrológico y la conservación y la mejora de las masas de agua y suelos, mejorar la eficiencia energética en las explotaciones de regadío y en general en la productividad de las mismas (Orden TED 1148/2024). Muchas de estas actuaciones se están llevando a cabo en la actualidad.

### 2.3 Nexo agua-energía

En la agricultura de regadío, el nexo agua-energía es considerado en términos de la energía requerida para la captación, transporte, y aplicación del agua para abastecer las necesidades de los cultivos e incrementar la productividad de estos. Por tanto, la demanda energética del sistema varía en función de la energía requerida en cada uno de esos procesos. La fuente principal de agua es superficial y supone el 74 % del total de agua extraída, seguida con un 24 % de las aguas subterráneas y en menor porcentaje del agua procedente de trasvases, desalación y aguas depuradas (INE, 2020). La energía requerida en la captación varía significativamente en función de la fuente del recurso siendo el agua superficial la que tiene menos requerimientos energéticos ( $0.06 \text{ kWh.m}^{-3}$ ). La demanda energética va incrementándose en la medida que el agua requiere un transporte, elevación o tratamiento ( $0,004 \text{ kWh.m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$ ) llegando a alcanzar  $3,7 \text{ kWh.m}^{-3}$  cuando el agua es desalada (Corominas, 2010).

La figura 5 muestra cómo evoluciona el binomio agua-energía en el regadío español desde 1950 a 2024. En este periodo, los usos de agua se duplican mientras que la energía (estimada) se multiplica por un factor de 15.

Puede observarse también cómo desde 2004 la curva se hace muy vertical por el aumento del riego a presión, debido a la modernización del regadío, y por haber alcanzado el máximo de agua extraída (Berbel et al. 2025).



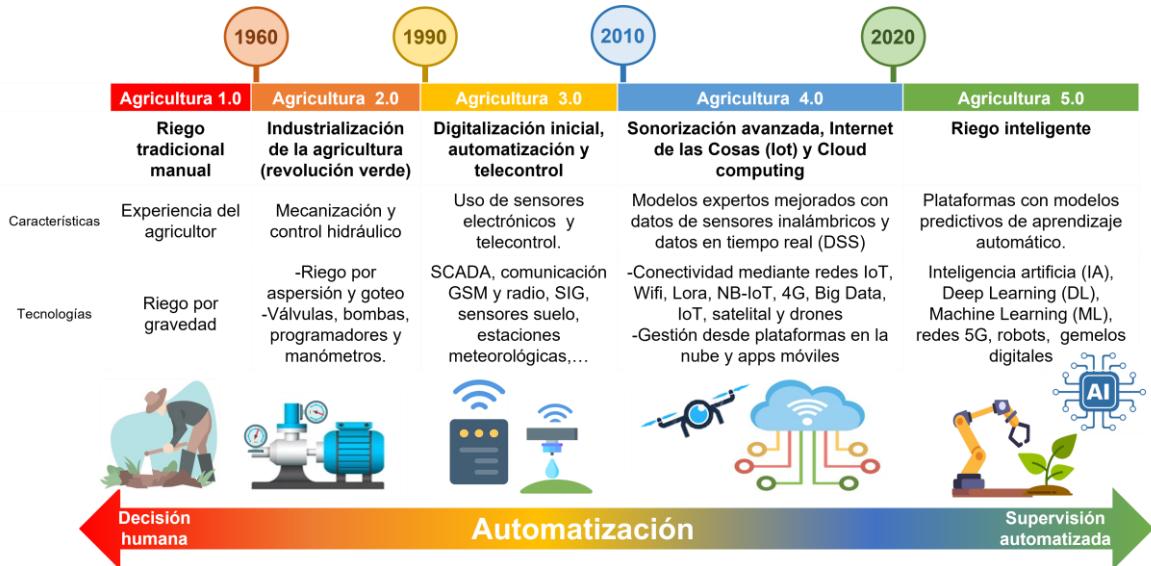
**Figura 5. Binomio agua energía en el regadío español (1950-2024)**

FUENTE: Berbel et al, 2025

La dependencia energética, la escasez de agua y el uso conjunto de ambos recursos deben de actuar como catalizadores para la adopción de las nuevas tecnologías y la IA y el establecimiento de estrategias que optimicen el uso conjunto.

### 3. Etapas en la evolución del riego

Una vez analizado el contexto y marco que nos sirve de referencia veamos ahora en qué situación se encuentra nuestro regadío y que diferentes niveles de automatización han tenido lugar. Hasta llegar a la situación en la que nos encontramos ha habido una evolución en diferentes etapas, según y de acuerdo con el nivel de supervisión humana (Endsley, 2017). La transición al riego sin agricultor totalmente autónomo puede considerarse un proceso de cinco etapas (Sales et al., 2025) (figura 6). Hasta que se consiga un riego inteligente e independiente, es decir autónomo, como algo habitual en las explotaciones agrícolas aún queda un largo camino por recorrer, aunque será una cuestión de tiempo.



**Figura 6. Etapas en la evolución del riego**

Veamos, por tanto, cuáles son las etapas que observamos en la figura 6.

- *Riego Manual (Agricultura 1.0)*

La planificación del riego está basada en la experiencia del agricultor, a través de observaciones como el aspecto de las plantas, el suelo, la sensación térmica y el pronóstico sobre el tiempo. Esta planificación es realizada para una explotación y para un periodo de tiempo corto. Suele presentar una baja eficiencia en el riego ya que el método de riego es por superficie. Esta etapa se considera sin automatización.

- *Riego con cierta automatización (Agricultura 2.0)*

En esta etapa se usan métodos de cálculo como los modelos de evapotranspiración de la FAO que están basados en datos meteorológicos históricos. Existen cierto nivel de automatización como son programadores y los métodos de riego usados son más eficientes. La planificación de riego también suele ser a escala de explotación y la resolución temporal también es corta. Los planes de riego siguen siendo de baja resolución temporal y espacial, utilizando un sistema de riego configurado manualmente. Esta etapa se basa en el conocimiento experto y en herramientas de cálculo sencillas y es de automatización mínima.

- *Riego de Precisión (Agricultura 3.0)*

Un paso importante hacia el aumento de la automatización del riego es la mejora de los sistemas de monitorización. Sensores de humedad de suelo, sensores de planta, sensores climáticos, medida de caudales y otro tipo de sensores. Aquí se permite un riego con variabilidad espacial según las características del suelo. Además, en la planificación del riego se puede tener en cuenta las fases del cultivo, las tarifas eléctricas, la reducción de las dotaciones de riego etc. Aunque hay un mayor nivel de automatización, la gestión es realizada por el agricultor o por expertos.

- *Riego basado en datos (Agricultura 4.0)*

La principal diferencia entre esta etapa y la anterior es la incorporación de datos de diferentes fuentes mediante protocolos IoT (Internet de las cosas) y cálculo en la nube. Con esto se consigue un sistema integral. Este sistema utiliza el conocimiento de la etapa anterior (Riego de Precisión) y es mejorado y enriquecido con otros datos y con modelos parametrizados que se basan en la experiencia (por ejemplo, humedad objetivo del suelo y consumo máximo de agua). Este enfoque permite un mejor uso de los datos de los sensores para proponer planes de riego con mayor resolución espacial y temporal. Los agricultores pueden elegir entre diferentes planes y escenarios propuestos y, si lo desean, ajustarlos antes del riego. La automatización en la toma de decisiones de gestión favorece que el riego sea realizado por ordenador con el control del agricultor. En esta etapa la automatización no es total, aunque mucho mayor que en las etapas anteriores.

- *Riego inteligente (Agricultura 5.0)*

En este tipo de riego el agricultor decide sobre la estrategia, pero casi todas las acciones operativas las realizan las máquinas. Estos sistemas de riego totalmente automatizados requieren un mayor control y monitorización y deben tener capacidad de evolucionar de forma autónoma y adaptarse a diferentes condiciones. Aunque los sistemas de riego sin agricultor actúan de forma autónoma colaborarán con otros sistemas como pueden ser los de gestión energética. Todavía se requiere un gran esfuerzo de investigación y desarrollo tecnológico para implementar la automatización completa en la producción a gran escala. La aplicación de esta forma de riego inteligente ha sido a pequeña escala. Dentro de este riego inteligente y agricultura 5.0, se encuentran los Gemelos Digitales (ver apartado 6.3 y caso de uso en el apartado 8.2) como herramienta que ayuda al proceso de toma de decisiones. Esto gemelos digitales han sido ya aplicados en experiencias piloto en diversos cultivos y sistemas de riego (Flores et al., 2025).

Estudios recientes también han explorado el uso de modelos de IA generativos, como los LLM, o Grandes Modelos de Lenguaje (Large Language Models), en la agricultura (Rane et al., 2024; Wu et al., 2024). Usando estos modelos, que ayudan a diluir la barrera tecnológica entre ciencia y campo, en un futuro, puede un agente de riego ayudar con LLM a los agricultores a establecer y supervisar el riego y otros objetivos operativos mediante una interfaz de chat o voz. Esto que parece ciencia ficción es ya una realidad en otros sectores como el industrial.

## 4. Fundamentos de la Inteligencia Artificial Aplicada al Agua

La Inteligencia Artificial (IA) es un conjunto de métodos y algoritmos que desarrolla sistemas capaces de emular las capacidades cognitivas del ser humano como visión y capacidad de razonamiento para realizar tareas complejas como: aprender de datos históricos y en tiempo real, reconocer patrones ocultos en grandes volúmenes de información, tomar decisiones optimizadas sin intervención humana

directa, adaptarse y mejorar continuamente mediante el aprendizaje automático, predecir escenarios futuros con alta precisión.

Sin embargo, para una aplicación efectiva en ingeniería hidráulica, debemos ir más allá de las definiciones genéricas y profundizar en arquitecturas específicas y sus sinergias. De entre las técnicas de IA relevantes para el regadío podemos citar las siguientes:

- *Algoritmos Genéticos*

Técnicas de optimización inspiradas en la evolución biológica para: Diseño óptimo de redes de distribución, programación de turnos de riego, asignación de recursos hídricos entre usuarios, Optimización multiobjetivo (económica, energética, ambiental)

- *Lógica Difusa (Fuzzy Logic)*

Maneja la incertidumbre inherente a los sistemas naturales: Toma de decisiones con información imprecisa, Control adaptativo de sistemas de riego, Integración del conocimiento experto de agricultores

- *Machine Learning (Aprendizaje Automático)*

Permite a los sistemas aprender de datos históricos y hacer predicciones sobre: Necesidades hídricas de cultivos, demanda futura de agua en la red, comportamiento de acuíferos, eficiencia energética óptima etc.

Entre ellos hay que destacar, los árboles de decisión como herramientas para la clasificación de situaciones operativas, Recomendaciones de estrategias de riego, Diagnóstico de problemas en la red hidráulica.

- *Deep Learning (Aprendizaje Profundo)*

Modelos computacionales inspirados en la interconexión neuronal del cerebro humano que pueden: Modelar relaciones no lineales complejas entre variables, predecir niveles piezométricos de acuíferos, estimar la recarga natural de acuíferos, optimizar la programación de riegos etc. Sus adaptaciones más avanzadas permiten el procesamiento de imágenes satelitales y de drones, detección temprana de estrés hídrico en cultivos, análisis de grandes volúmenes de datos de sensores, clasificación automática de tipos de suelo y vegetación.

- *IA generativa (modelos LLM)*

Aunque este subgrupo pertenece al campo del deep learning, debido a su importancia, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo, así como su potencial de adaptación, merece una mención distintiva. Se caracterizan por ser redes neuronales entrenadas con cantidades masivas de datos de texto. Gracias a su arquitectura y a su capacidad de aprender patrones complejos en el lenguaje, estos modelos de lenguaje de gran tamaño son capaces de realizar tareas como la generación automática de textos, el resumen de información y la respuesta a preguntas. Los LLM son la base de asistentes como ChatGPT, Gemini, Copilot, Claude, DeepSeek, Ollama. Los modelos de lenguaje LLM están marcando una diferencia significativa en el campo de la inteligencia artificial, ya que tienen la

capacidad de comprender, generar y procesar el lenguaje natural a un nivel que antes era impensable. A medida que la tecnología continúa avanzando, es evidente que los LLM serán una pieza fundamental en el desarrollo de aplicaciones de IA que interactúen con los seres humanos de forma más natural e intuitiva.

Para tareas de gestión ofrece grandes posibilidades y serán una herramienta indispensable para gestores de comunidades de regantes.

Dentro de la IA generativa, los agentes LLM son sistemas de inteligencia artificial que utilizan modelos de lenguaje grandes (LLM) para realizar tareas complejas de forma autónoma, planificando y ejecutando múltiples pasos sin supervisión constante. A diferencia de los LLM tradicionales, pueden interactuar con su entorno, usar herramientas como la web y otras aplicaciones, y aplicar memoria para razonar, planificar y adaptarse contextualmente. Algunas aplicaciones interesantes pueden ser asistentes virtuales y chatbots, automatización de tareas, generación de contenido.

## 5. Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la gestión del agua

Debido a las particularidades que tiene la gestión del agua superficial y subterránea podemos diferenciar entre la aplicación de la IA en la gestión de ambas, aunque sabiendo que hay características que son comunes.

### 5.1 Aplicaciones de la IA en la gestión del agua superficial

La IA revoluciona la gestión de canales, embalses y redes de riego mediante modelos mixtos que incorporan modelos dinámicos, multivariantes y series temporales, es posible realizar una gestión predictiva integral. Por ejemplo, un modelo mixto puede combinar la predicción meteorológica (serie temporal) con el precio de la energía (multivariante dinámico) y el estado fenológico del cultivo (biológico) para optimizar el bombeo.

En cuanto a predicción de demanda los modelos predictivos anticipan cuándo y dónde se producirá la mayor demanda de agua, la optimización de la apertura y cierre de compuertas en canales.

Respecto a la gestión inteligente de los sistemas de distribución de agua permite decidir de forma automática las bombas a activar y en qué momento hacerlo, la gestión dinámica de las estaciones de bombeo, la optimización de las tarifas eléctricas, la integración con energías renovables (solar, hidráulica) etc.

En el mantenimiento predictivo, podemos identificar tuberías con exceso de presión, detección de roturas, optimización de rutas y programación del mantenimiento, reducción de costes operativos.

A través de la IA se puede gestionar de manera inteligente los sistemas de almacenamiento. Por ejemplo, se pueden predecir las aportaciones futuras basadas en las predicciones meteorológicas, gestionar diferentes usos como

puede ser energético, riego etc., optimizar el llenado de acuerdo la previsión de la demanda de riego y de las tarifas eléctricas o en el caso de disponer de planta fotovoltaica gestionar el llenado según la producción de energía y su predicción futura, también se puede gestionar y predecir la calidad del agua embalsada.

## 5.2 Aplicaciones de la IA en la gestión de aguas subterráneas

La IA combinada con modelos físicos (MODFLOW, FEFLOW) ofrece ventajas sin precedentes como son acelerar los cálculos, mejorar la calibración, mayor precisión en la predicción de flujos subterráneos complejos etc. MODFLOW en concreto es capaz de representar el flujo de agua subterránea en una, dos o tres dimensiones, en acuíferos mono o multicapa, de funcionamiento libre, confinado o mixto, y bajo condiciones de régimen permanente o transitorio. Permite simular flujos externos como el inducido por pozos, la recarga por áreas, el flujo a través del lecho del río y la evapotranspiración. Puede considerar la heterogeneidad en el acuífero ya que permite contemplar la distribución espacial de valores de transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

Todo ello permite la simulación en acuíferos complejos, predecir el comportamiento bajo diferentes escenarios de extracción, evaluar el impacto del cambio climático en la recarga, predecir la evolución de los niveles freáticos y anticiparse a descensos peligrosos. Predecir los efectos de la recarga tras episodios de lluvia, adelantar alertas tempranas en situaciones de sobreexplotación.

La IA facilita la cuantificación de la recarga natural integrando datos de precipitación, evapotranspiración, infiltración etc., permite la disponibilidad de agua subterránea mediante la predicción de escenarios futuros de cambio climático.

Los sistemas inteligentes son también usados en la monitorización automática de sondeos con contadores basados en IoT.

La IA contribuye también a la prevención de la contaminación por la migración de nitratos, pesticidas etc., a identificar zonas vulnerables a la contaminación a optimizar prácticas agrícolas para minimizar los lixiviados. Por otra parte, nos ayuda a monitorizar la calidad y a establecer tendencia en los parámetros de calidad y a definir alertas tempranas ante la merma de calidad del agua.

La interacción y utilidad de la IA para la construcción y gestión de gemelos digitales es fundamental. Un gemelo digital cognitivo no solo replica el estado actual del acuífero, sino que utiliza agentes de IA para simular miles de escenarios futuros en tiempo real.

## 6. Tecnologías Inteligentes para un riego sostenible

Las soluciones digitales para las explotaciones agrícolas de regadío contribuyen a una gestión eficiente del recurso más crítico en la agricultura como es el agua.

La tecnología es clave para maximizar la eficiencia del uso del agua, además de tomar un papel muy importante en la mejora de rendimientos y productividad en los cultivos.

## 6.1 Sensores

Los sensores nos permiten obtener datos e información de lo que está ocurriendo con relación al agua. La información la pueden almacenar para posteriormente descargarla de forma manual o directamente transmitirla como hacen los sensores IoT.

Los sensores los podemos dividir según su proximidad al objeto de estudio, en remotos y cercanos (figura 7).

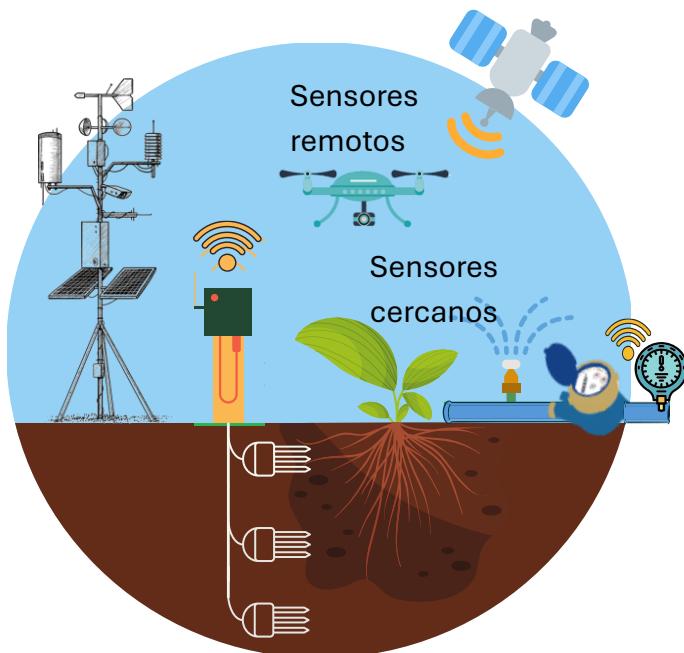


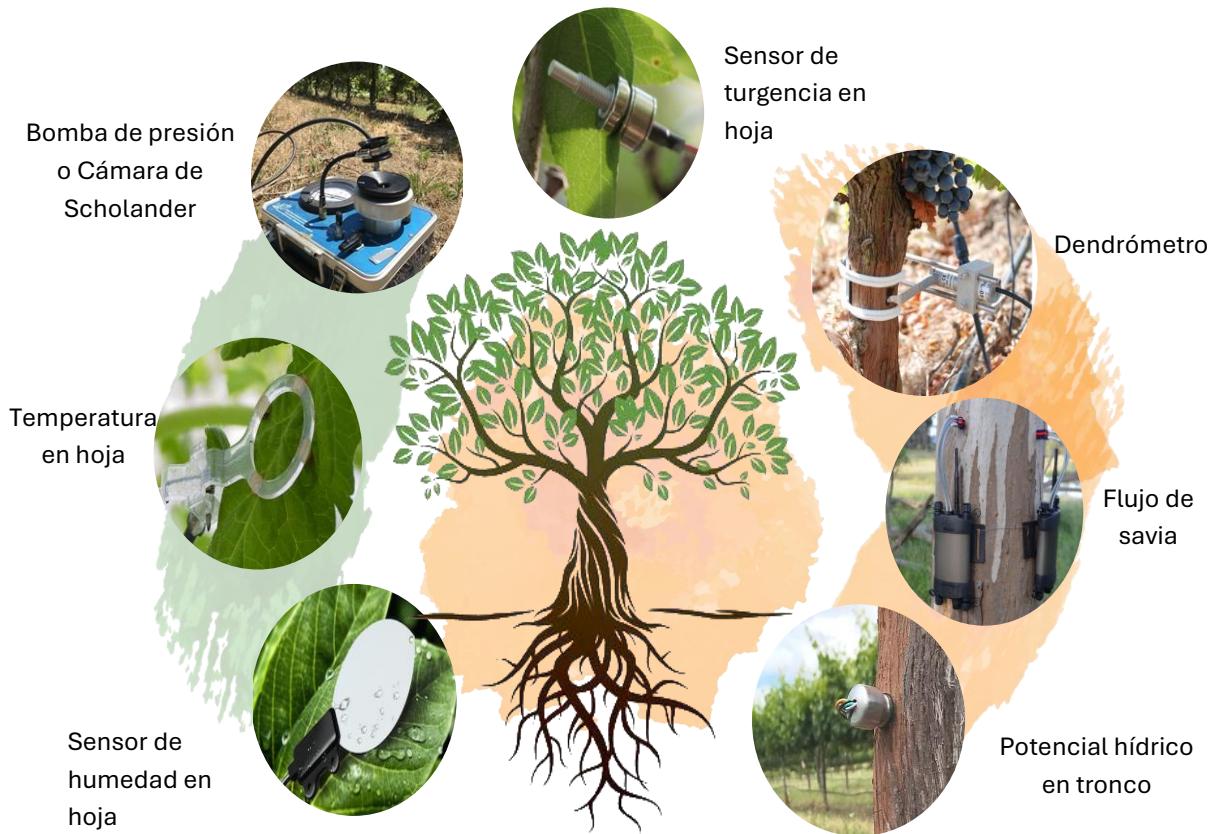
Figura 7. Tipos de sensores en función de su proximidad al medio de estudio

Dentro de los sensores cercanos, especialmente nos interesa en el riego, los sensores de planta, los sensores de suelo, los sensores climáticos y los que monitorizan el riego.

### 6.1.1 Sensores de planta

La medición del estado hídrico de la planta es el mejor indicador para el riego, ya que suele reflejar mejor la respuesta agronómica del cultivo al régimen de riego impuesto. El estado hídrico de la planta depende de la humedad del suelo, demanda evaporativa (clima) y de la tasa de transpiración.

En la figura 8 puede verse un detalle de diversos tipos de sensores usados en planta.



**Figura 8. Tipos de sensores de planta**

Los sensores de temperatura en hoja tienen la posibilidad de trabajar a diferentes escalas (planta, parcela o cuenca), es aplicable a cualquier cultivo además la información se obtiene de manera muy sencilla y rápidamente. Ahora bien, la información es difícil de interpretar ya que la temperatura del cultivo no solo está relacionada con la transpiración, sino que también está relacionada con el viento radiación, temperatura del ambiente y la humedad ambiental. También el coste para equipos de precisión es elevado.

Los sensores de humedad de hoja miden una hoja del cultivo y permiten conocer el tiempo y nivel de humectación del follaje del cultivo. Se pueden usar para integración en modelos predictivos de plagas y enfermedades. Requieren más información ambiental como temperatura, precipitación, estado fenológico del cultivo etc.

La cámara de Scholander determina el estado hídrico de la planta a través de las mediciones del potencial hídrico de la misma. Ahora bien, los valores umbrales de potencial pueden cambiar en función del tipo de cultivo y su tolerancia al estrés. También tiene como inconveniente que es una medida manual y puntual.

El inconveniente anterior es solventado por los sensores de potencial hídrico ya que proporcionan una toma de datos en continuo y de forma remota. No obstante, son costosos, se deterioran con el tiempo y solo es aplicable a cultivos leñosos.

Los sensores de flujo de savia permiten determinar el consumo real de la planta mediante mediciones del flujo. El flujo de savia está relacionado con la transpiración. Las medidas son automáticas y continuas y la transmisión de datos se puede realizar de forma fácil. Requiere calibración para cada cultivo, su uso hasta ahora se limita a investigación con escasa aplicación comercial. La aplicación principal es a cultivos leñosos y a algunos herbáceos de tallo recio y grueso (girasol o maíz).

El dendrómetro es uno de los dispositivos de monitorización de cultivo más usado. Estos dispositivos miden las fluctuaciones en el diámetro del tronco que se producen al variar el estado hídrico del cultivo. En función de estas fluctuaciones se pueden establecer programaciones de riegos. Permite la lectura continua y requiere calibración. También las fluctuaciones pueden depender del tamaño del tronco, edad del árbol, localización de los sensores etc.

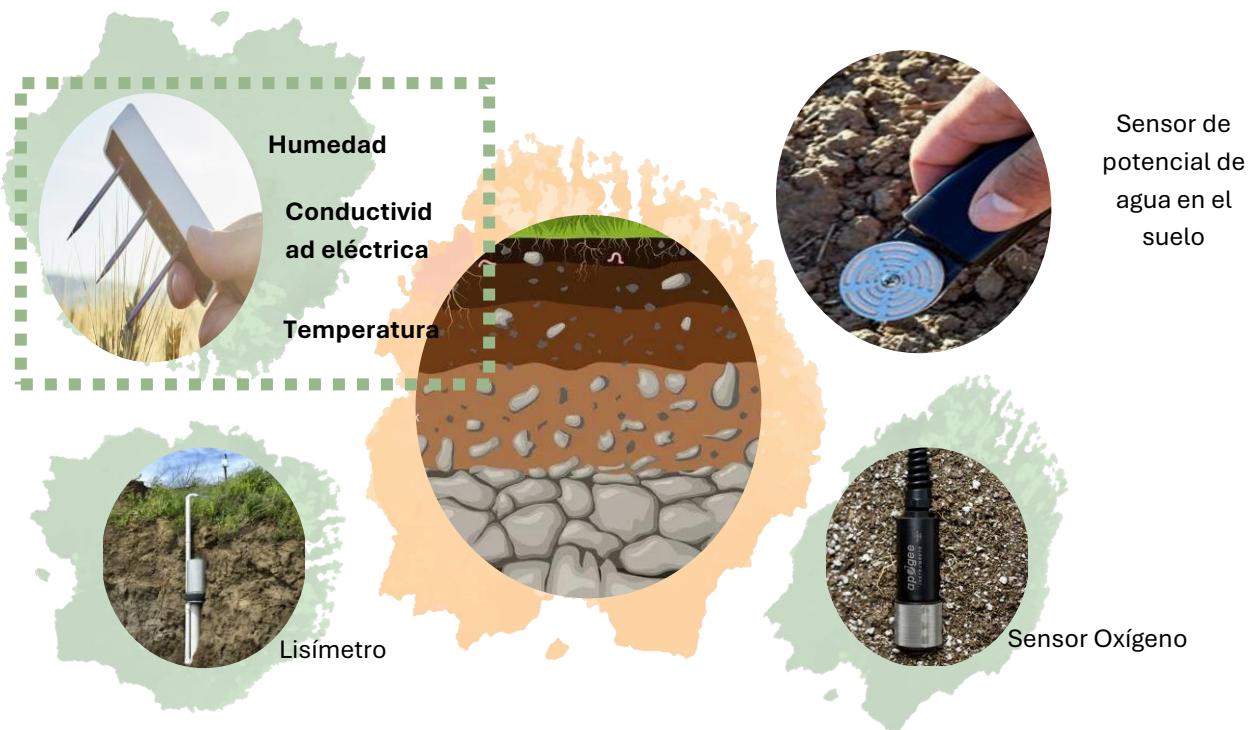
El sensor de turgencia realiza una medida relacionada con el estado hídrico de la planta. Las medidas son continuas y automáticas y permite la transmisión remota de datos. Existe facilidad para interpretar resultados usando como referencia la forma de la curva. Se aplica solo a cultivos leñosos con cierta firmeza en la hoja. Requiere mantenimiento y calibración anual y depende de la orientación elegida en el árbol. Es difícil su aplicación para programar riegos.

El problema de las mediciones directas sobre la planta es que es posible encontrar respuestas del cultivo ante situaciones de exceso de agua que son iguales que las que se producen en condiciones de estrés. Por este motivo es necesario recibir información complementaria procedente de sensores de humedad del suelo y/o climáticos que permitan discernir la causa que desencadena una determinada respuesta medida en la planta.

Sin duda en los próximos años tendremos grandes avances en los sensores de planta.

### 6.1.2 Sensores de suelo

La respuesta del cultivo puede ser similar ante situaciones totalmente opuestas, por lo que las mediciones de estado hídrico realizadas directamente sobre la planta deben analizarse junto con la información del estado del suelo y el ambiente. En la figura 9 pueden verse diferentes sensores de suelo.



**Figura 9. Sensores de suelo**

Los sensores de humedad miden el contenido de agua en el suelo, expresado en términos volumétricos o gravimétricos. Deben instalarse de forma cuidadosa, en riego localizado bajo la vertical de un gotero y en la zona de mayor contenido radicular.

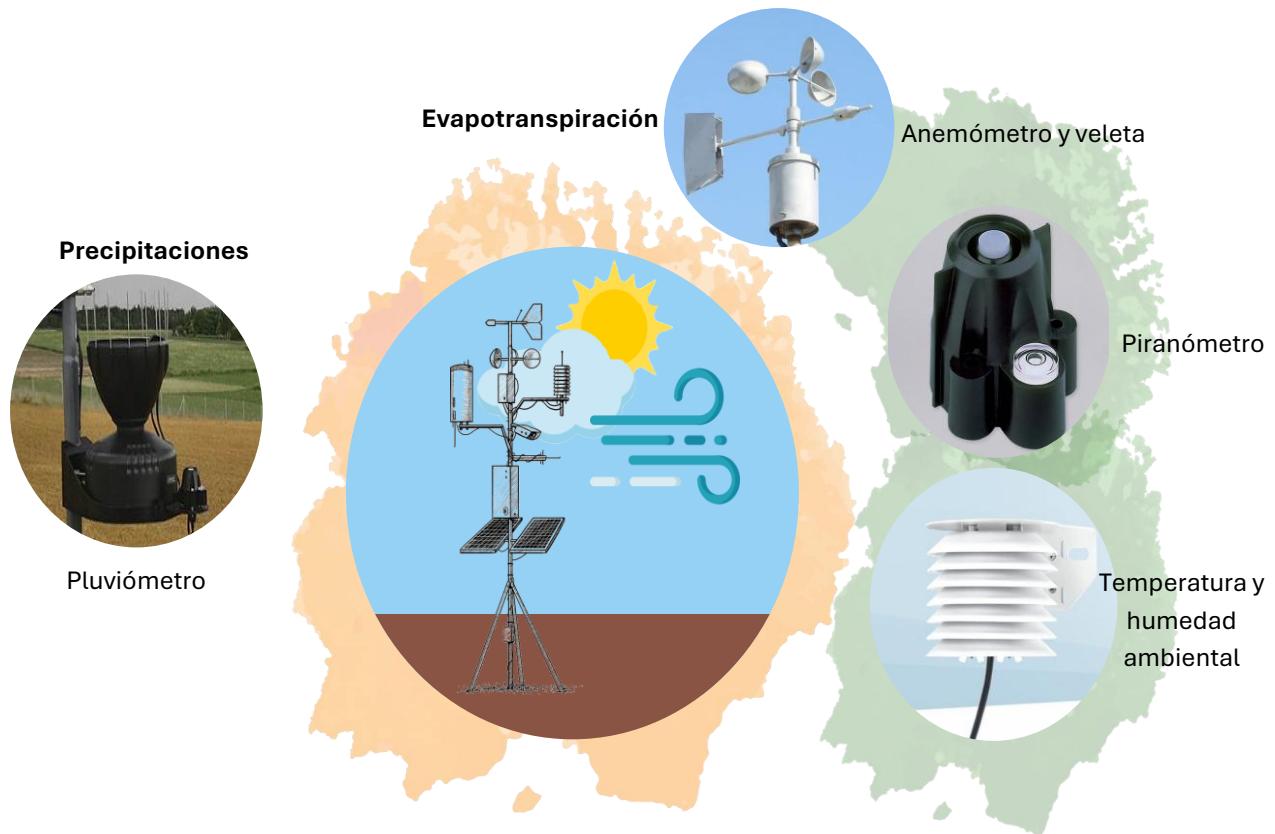
Las mediciones de potencial hídrico en el suelo no informan del contenido de agua en el mismo, pero si informan del potencial, es decir de la energía a la que se encuentra retenida el agua y por tanto, el esfuerzo que debe realizar la planta para extraer del suelo el agua que necesita.

El sensor de conductividad mide la concentración de sales a través de la conductividad eléctrica. Cuanto mayor es la concentración de sales mayor es la conductividad eléctrica.

Otro parámetro que habitualmente se mide con el sensor de suelo es la temperatura.

#### 6.1.3 Sensores climáticos

Respecto a las variables climáticas más interesantes para el riego son las que podemos ver en la figura 10. Hay que decir que los sensores climáticos son los primeros que se desarrollaron, de los que existe mayor oferta comercial y los más fiables. La información proporcionada por los mismos es muy usada agrícolamente y a partir del uso de datos masivo se pueden usar modelos avanzados para predecir entre otras cosas posibles enfermedades, necesidades de riego o producción esperada.

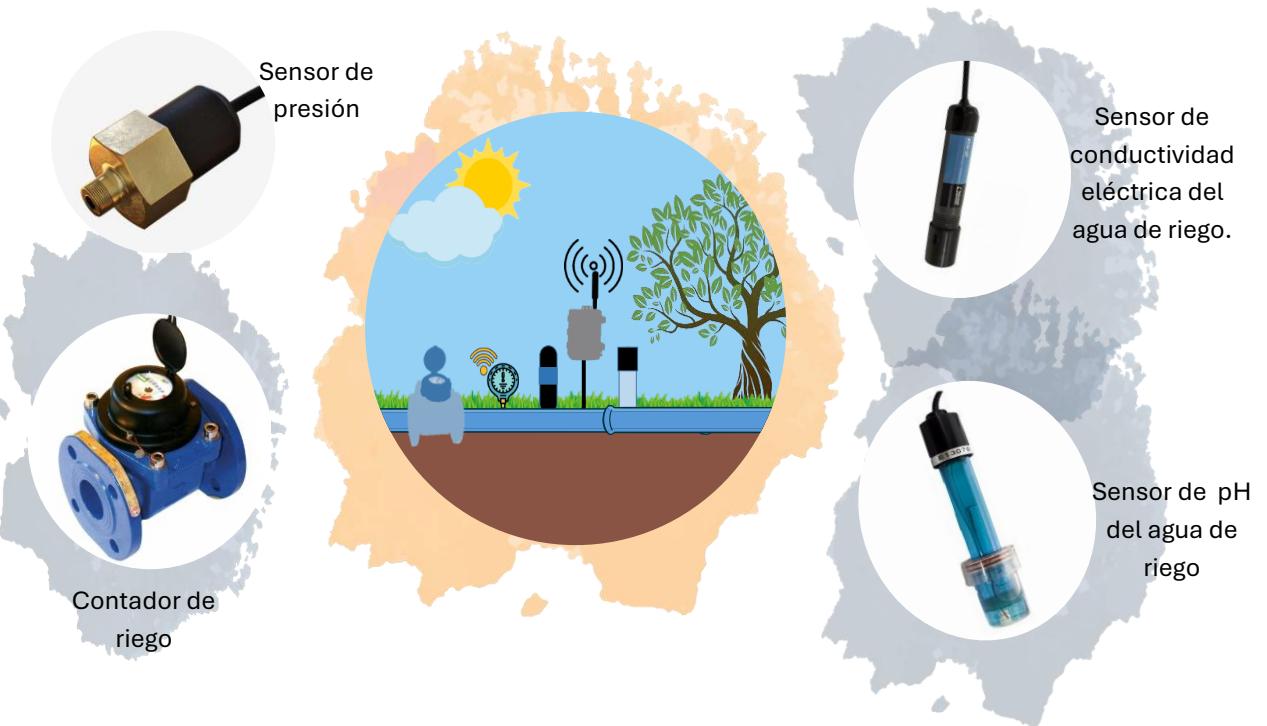


**Figura 10. Variables climáticas**

Todas las variables anteriores podemos bien medirlas en una estación propia o descargarlas de la red nacional SIAR (Servicio Integral de Asesoramiento al Regante) (<https://servicio.mapa.gob.es/websiar/>). En España tenemos la posibilidad de contar con una amplia red de estaciones agroclimáticas.

#### 6.1.4 Sensores hidráulicos para monitorizar el riego

En la instalación de riego es muy importante medir diversas variables relacionadas con la infraestructura hidráulica de riego (ver figura 11).



**Figura 11. Monitorización del riego**

Las variables hidráulicas que tienen especial interés son el caudal y la presión. El primero porque debemos asegurarnos de que los volúmenes de agua aplicados se corresponden con las necesidades de riego previstas. La presión porque nos ayuda a detectar posibles fugas y averías y porque a través de ella podemos detectar excesos de presión y establecer estrategias de ahorro energético.

La conductividad eléctrica del agua nos indica como usar los fertilizantes y a establecer unas necesidades de lavado que dependerán, entre otras cosas, del cultivo.

El sensor de pH es otro sensor relacionado con la calidad del agua y que previenen de daños al cultivo y de deficiencias en absorber los nutrientes.

## 6.2 Sensores remotos

Las aplicaciones de teledetección en agricultura se basan en que la vegetación refleja el infrarrojo cercano y absorbe el rojo. Existe un índice de vegetación, que es el más utilizado, y que establece la diferencia entre estos dos colores. Este es el NDVI o índice de vegetación de diferencia normalizada. Si hay mucha diferencia, es que hay mucha vegetación y está sana, y si no la hay, es que hay poca vegetación o está estresada. Para facilitar su uso se procede a hacerlo estándar y se normaliza, haciendo que valores próximos a 0 se correspondan con un suelo desnudo

(aproximadamente 0,1-0,15), y valores próximos a 1 se corresponden con un cultivo que cubre totalmente el suelo, por ejemplo, una alfalfa sana en máximo desarrollo.

La rápida evolución de los satélites ha hecho que aumente la resolución temporal y espacial. El satélite Sentinel 2, el más utilizado en agricultura, de la misión espacial Copernicus de la Unión Europea proporciona una imagen cada 5 días y con una resolución espacial de 10x10 m, por lo que podemos calcular un valor de NDVI por cada 100 m<sup>2</sup> de suelo, es decir que no podemos llegar a distinguir lo que se encuentra en esa superficie. Hay satélites con mayor resolución temporal y espacial (ver tabla 1) pero también de mayor coste.

**Tabla 1. Satélites usados con fines agrícolas**

Resolución	Rango (metros/píxel)	Misiones Satelitales	Aplicaciones Típicas
<b>Baja</b>	250m - 1000m+	MODIS, NOAA AVHRR, Sentinel-3	Monitoreo global, clima, ecosistemas.
<b>Media</b>	5m - 30m	Sentinel-2 (10m), Landsat 8/9 (30m), RapidEye (5.5m)	Agricultura, gestión forestal, ambiental.
<b>Alta</b>	1m - 5m	Sentinel-1 (5m SAR), PlanetScope (3-5m)	Detalle medio-alto, monitoreo de cambios.
<b>Muy Alta</b>	<1m	WorldView-3, GeoEye-1, Pleiades, SkySat	Planificación urbana, seguridad, cartografía detallada.

Las aplicaciones en regadío de los datos proporcionados por los satélites son muy útiles, desde la gestión de los recursos a escala de cuenca hasta la implementación de técnicas de riego de precisión, que permiten aplicar de forma diferenciada el riego según las distintas necesidades del cultivo dentro de la parcela.

Para la gestión del agua a escala de cuenca es esencial determinar los cultivos establecidos en cada parcela. Por ejemplo, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) utiliza la teledetección con inteligencia artificial mediante el análisis de espectrometría satelital multibanda y modelos de machine learning en Doñana para vigilar y controlar el uso del agua, principalmente identificando el cultivo de arroz y los cultivos bajo plástico. Con ello se puede tener un control y seguimiento de la superficie de cultivo de manera automática llegando a publicar los resultados en un portal web (<https://teledeteccion.gie-us.es/>).

A una escala menor, podemos hacer un seguimiento de nuestro cultivo en parcela y así relacionar el NDVI con el estado fenológico de nuestro cultivo y poder estimar las necesidades de riego. Son numerosos los trabajos que han relacionado el NDVI con el coeficiente de cultivo (kc) que permite, junto a las estaciones agroclimáticas, determinar las necesidades de riego. Con esta información y un sensor de humedad en el suelo, el ahorro de agua puede llegar a ser muy considerable.

La herramienta de libre acceso SATIVUM (<https://www.sativum.es>), desarrollada por el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACyL) puede utilizarse sobre una imagen de un día concreto o también, como curva temporal, es decir,

siguiendo su evolución desde la nascencia hasta la senescencia del cultivo. Esta curva permite interpretar el desarrollo de este, pudiendo detectar desviaciones respecto al comportamiento esperado y ayudando a la toma de decisiones.

El carácter espacial de la información, que nos dice el estado del cultivo cada 100 m<sup>2</sup> de la parcela, permite determinar necesidades hídricas diferenciadas en la parcela. Así, si nuestro sistema de riego nos lo permite, podemos suministrar diferentes dosis según el desarrollo del cultivo en cada parte de la parcela.

Hay satélites que tienen sensores térmicos para medir la temperatura de la superficie terrestre. Cuando un cultivo está bien regado transpira mucho y por lo tanto, la temperatura es menor que cuando está estresado, ya que en este caso cierran parcialmente las estomas para transpirar menos. Hay ya procedimientos que están basados en balance de energía con los que se puede determinar la evapotranspiración del cultivo de manera precisa. Un índice que cada vez es más usado es el índice de estrés hídrico del cultivo CWSI (Crop Water Stress Index), donde se relaciona la temperatura del cultivo con la temperatura atmosférica y la humedad relativa, se normaliza entre 0 y 1, correspondiente a planta no estresada y completamente estresada, respectivamente.

Las imágenes de satélite tienen limitación para cultivos leñosos ya que hay una gran proporción de suelo sobre vegetación. El porcentaje de cubierta vegetal suele ser muy bajo, llegando a cultivos como la vid a un 14 %. En estos casos los drones presentan grandes ventajas al tener resoluciones de hasta 1 cm<sup>2</sup> (nivel de hoja) y cada planta puede ser estudiada y diferenciada del resto. Además, los drones pueden montar cámaras multiespectrales e hiperespectrales.

Al tener tan elevada resolución se puede usar con otros fines como detectar fugas en los sistemas de riego, volúmenes de vegetación al poder determinar la altura de la vegetación, entre otras aplicaciones. Por el contrario, la limitación está en el coste, en el procesamiento de la información y en la autonomía.

Un avance más consiste en integrar toda la información recogida en campo a través de los sensores en un modelo de crecimiento del cultivo. En este sentido Puig (2025) mejora las predicciones del modelo de cultivo AquaCrop con datos de cubierta vegetal en tiempo real provenientes de cámaras RGB y variables meteorológicas provenientes de estaciones meteorológicas in situ y conjuntos de datos abiertos lo cual permite obtener estimaciones más precisas de las necesidades hídricas de los cultivos.

### 6.3Gemelos digitales

Según la norma ISO 30173 (ISO, 2023) un gemelo digital es la representación digital de una entidad objetivo, con conexiones de datos que permiten la convergencia entre los estados físico y digital a un ritmo de sincronización adecuado.

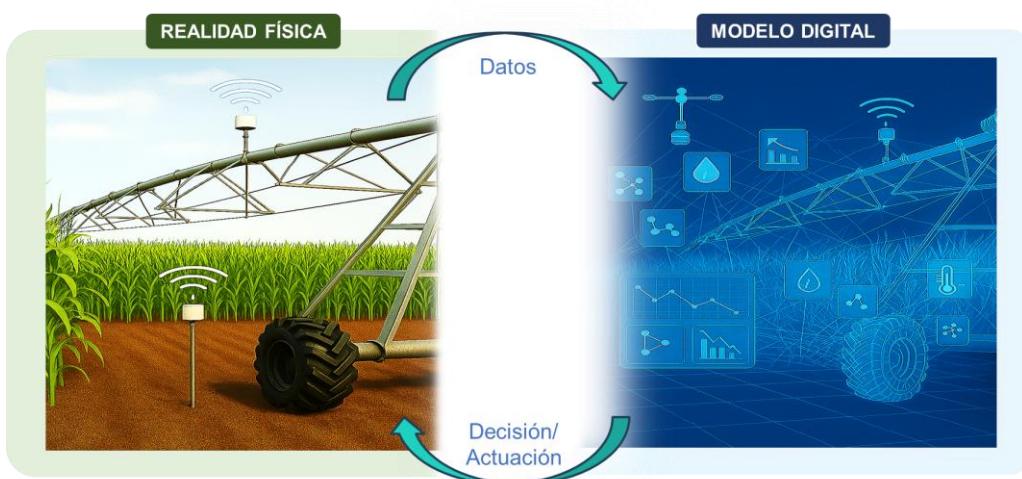
Entre los sistemas de soporte a la toma de decisiones (SSD) avanzados, los gemelos digitales (GD) han emergido como una tecnología innovadora con el

potencial de transformar la agricultura de regadío. Inicialmente desarrollados en el sector industrial, los GD han comenzado a ser implementados en el ámbito del riego para reproducir digitalmente sistemas agrícolas (Ferrer et al., 2023, Purcell et al., 2023).

El fundamento de un gemelo digital está en ser la representación virtual de un sistema físico real, con el cual mantiene una comunicación en tiempo real mediante sensores, que monitorizan las variables clave, lo que permite simular diversos escenarios de operación para su posterior análisis y toma de decisiones.

En los últimos años, la mejora y abaratamiento de los sistemas de monitorización y de comunicación de la información ha impulsado, entre otros factores, el desarrollo de GD aplicados al sector agrario (Bellvert et al., 2023, Clementi et al., 2024). Sin embargo, la mayoría de los trabajos existentes se centran en el desarrollo de modelos complejos y personalizados, diseñados específicamente para generar el gemelo GD hidráulico del sistema de riego.

Por tanto, un GD es una representación virtual, dinámica y en tiempo real de un objeto físico o un proceso, que se actualiza con datos en tiempo real procedente de sensores. El GD tiene una parte física y una digital y entre ambos debe haber un intercambio bidireccional de información. La información del mundo físico recogida por sensores se transfiere al GD. Esa información es analizada y utilizada por el GD para simular escenarios y tomar decisiones que permiten actuar o enviar instrucciones al elemento físico (ver figura 12). Los modelos virtuales pueden predecir y abordar problemas no detectados en el campo (Alves et al., 2023).



**Figura 12. Esquema de un Gemelo Digital**

Los GD pueden considerarse como el siguiente paso en la transformación digital dentro de la Agricultura 4.0, construyéndose en base a la agricultura de precisión con sensorización conectada (IoT) y simulación de procesos (Zhang et al., 2025, Purcell et al., 2023). Son, por tanto, la evolución natural de los sistemas de apoyo a la decisión, pues permiten evaluar muchos más escenarios a menor coste y

conseguir optimizar mejores decisiones que conllevan a mejorar la eficiencia y el rendimiento (Bellvert et al., 2023).

#### 6.4 Modelos de aprendizaje profundo (Deep Learning)

Los modelos de aprendizaje profundo o DL, del inglés Deep Learning, han transformado la gestión del riego, pasando de decisiones basadas en la experiencia a predicciones precisas basadas en datos e incorporando inteligencia en la toma de decisiones sobre riego. La arquitectura de un DL tiene claras ventajas en diferentes aspectos de la gestión del riego, incluyendo la identificación espacial, la predicción del contenido hídrico del suelo, la previsión a largo plazo y la optimización del uso del agua.

A pesar de los avances, el riego inteligente mediante DL enfrenta desafíos relacionados con la calidad de los datos, la capacidad de generalización de los modelos y las limitaciones de los recursos computacionales, así como barreras de aplicación como el coste, la aceptación y la adaptabilidad. Las arquitecturas colaborativas edge-cloud, una arquitectura donde una parte de la computación ocurre en el borde (para respuesta rápida) y otra en la nube (para análisis a gran escala, entrenamiento de modelos, son particularmente eficaces, reduciendo el volumen de comunicación y los tiempos de respuesta de minutos a segundos

Las técnicas de IA que utilizan datos de diversas fuentes también se están aplicando en la agricultura de regadío. Por ejemplo, la teledetección satelital y el aprendizaje automático (AA) han demostrado ser técnicas muy valiosas para proporcionar datos multitemporales a gran escala para la monitorización y la gestión del riego (Durgun et al., 2016; Piedelobo et al., 2018). Estas tecnologías también han abordado la clasificación y/o el seguimiento de cultivos (Cai et al., 2018; Chakhar et al., 2020; Shelestov et al., 2017), proporcionando resultados de alta calidad. En este contexto, Copernicus Open Access Hub y Earth Explorer son proveedores de datos abiertos que ofrecen imágenes de Sentinel-2 (S2) y Landsat-8 (L8), respectivamente (Colkesen y Kavzoglu, 2017). Ambas plataformas satelitales se han utilizado con éxito en el ámbito agrícola (Cai et al., 2018; Calera et al., 2017; Hansen y Loveland, 2012; Piedelobo et al., 2018).0

Sin embargo, la monitorización y la clasificación de cultivos, la monitorización del riego o incluso la estimación de la demanda hídrica de los cultivos no proporcionan suficiente información sobre las necesidades hídricas reales de una Comunidad de Regantes (CR), ya que otros factores, como la sensación térmica u otros aspectos sociales, están estrechamente relacionados con el agua aplicada por el agricultor. Se han desarrollado otros modelos para pronosticar la demanda hídrica en una CR, desde simples modelos de referencia para la predicción de la evapotranspiración (Ballesteros et al., 2016) hasta metodologías centradas en la predicción de la demanda hídrica a nivel de comunidad de regantes, utilizando algoritmos neurogenéticos (González Perea et al., 2015; Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2009). La predicción del comportamiento del agricultor fue abordada por González Perea (2017) y González Perea et al. (2018). Se desarrollaron dos modelos para

pronosticar la ocurrencia de eventos de riego (González Perea, 2017) y la lámina de riego diaria aplicada (González Perea et al., 2018).

## 7. Adopción de la tecnología en el regadío

En el ámbito agrícola, la adopción de tecnologías digitales está comenzando a redefinir los modelos de producción y gestión. El personal dedicado a la agricultura está incorporando progresivamente herramientas digitales en sus explotaciones, ya sea a través de sensores para la monitorización de cultivos, de drones para la gestión precisa de las tierras o de plataformas de análisis de datos que permiten predecir rendimientos y optimizar recursos. Esta transformación no solo está impulsando una mayor eficiencia y productividad, sino que también está abriendo nuevas posibilidades para enfrentar desafíos como la sostenibilidad ambiental, la competencia global y la fluctuación en los precios de los productos agrícolas.

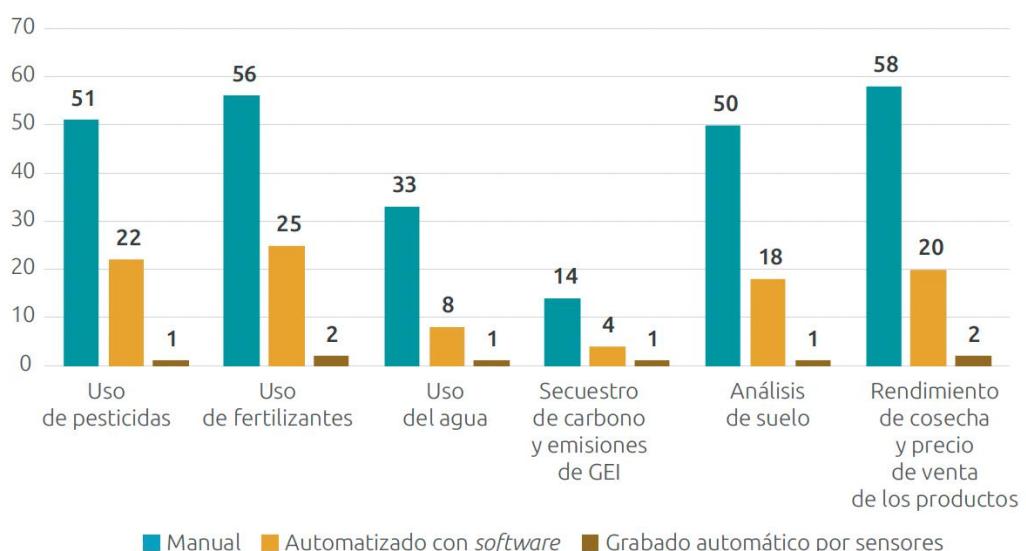
Recientemente y al amparo de la denominada Estrategia de Digitalización del Sector Agroalimentario y Forestal y del Medio Rural, impulsada por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, se ha creado el Observatorio de la Digitalización del Sector Agroalimentario Español (MAPA, 2025). Este observatorio de forma periódica elabora una memoria del estado de la digitalización de la agricultura española.

Pese a los beneficios tangibles que la digitalización ofrece, la adopción de estas tecnologías en el sector agrario español se enfrenta a importantes desafíos. Uno de los principales obstáculos es la resistencia al cambio, una barrera común en sectores con una larga tradición y métodos bien establecidos. Muchas personas del sector agrario, especialmente aquellos de mayor edad o con menos formación tecnológica, pueden mostrar escepticismo ante la adopción de nuevas herramientas, ya sea por desconocimiento o por desconfianza en los beneficios que realmente podrían obtener. La capacitación es otro factor clave que limita la adopción de la transformación digital. Implementar tecnologías avanzadas requiere un nivel de conocimientos y habilidades que no todas las personas del sector agrícola poseen. Aunque existen iniciativas para promover la formación digital en el sector, la brecha entre las competencias actuales y las exigidas por las nuevas tecnologías sigue siendo significativa. Ante estas dificultades y sus costes asociados, muchas explotaciones, particularmente las pequeñas y medianas, optan por mantener sus métodos tradicionales.

El retorno de la inversión es otro aspecto crucial. Aunque, en teoría, la digitalización puede generar ahorros y mejorar la rentabilidad, la inversión inicial en tecnología no siempre es asequible para todas las personas agricultoras. Para muchas explotaciones familiares o de tamaño reducido, el coste de adquisición de equipos avanzados como drones o sistemas de gestión basados en IA puede ser prohibitivo, especialmente si no existe una estrategia clara sobre cómo maximizar su uso. Además, la incertidumbre, respecto al tiempo necesario para recuperar la inversión, disuade a un gran número de ellas para dar el paso hacia la digitalización. La falta de una estrategia digital clara también actúa como freno. Si bien algunas

grandes empresas agrícolas han logrado integrar la digitalización de manera efectiva, el sector en su conjunto adolece de una visión coordinada que facilite la adopción masiva. Esto se agrava por la fragmentación del sector, con una alta proporción de explotaciones pequeñas y medianas que carecen de los recursos necesarios para implementar una estrategia digital integral. Finalmente, la ciberseguridad es una preocupación creciente. A medida que las explotaciones agrícolas se vuelven más dependientes de sistemas digitales, aumenta el riesgo de ciberataques, que pueden comprometer la operación y la seguridad de los datos. La protección contra estas amenazas requiere no solo de inversiones adicionales, sino también de un cambio de mentalidad para considerar la seguridad informática como una prioridad.

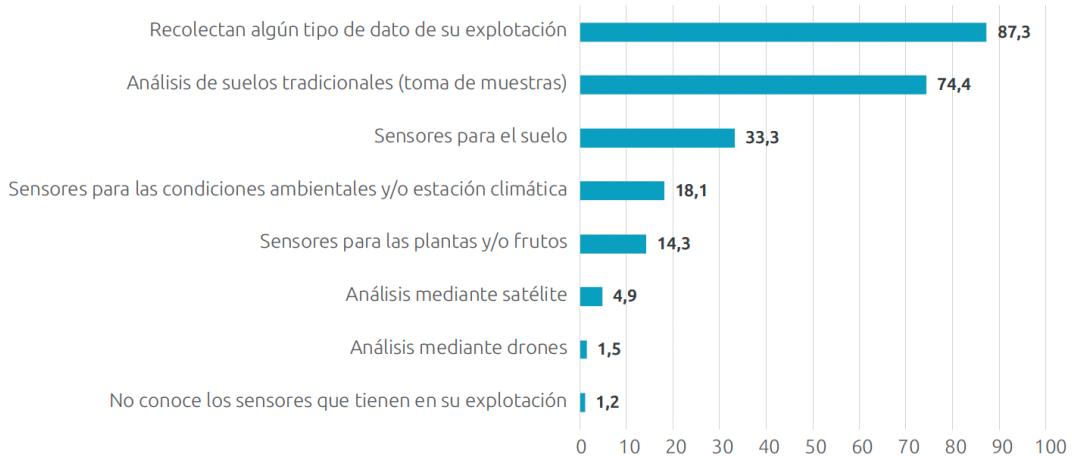
En España, cerca del 90 % de las personas del sector agrícola recogen algún tipo de dato de sus parcelas. Aunque no toda esa información se obtiene de manera automatizada, sino que se siguen empleando técnicas tradicionales para ello (figura 13).



**Figura 13. Recolección de datos en la agricultura española (n=2.069). En porcentaje.** Fuente: Observatorio de la Digitalización del Sector Agroalimentario Español (2024)

La Comisión Europea llevó a cabo una encuesta en la que se preguntó a los agricultores cómo obtenían los datos generados en sus explotaciones: mediante recolección manual, recolección automatizada con software o registro automático con sensores (Comisión Europea, 2025). Las dos últimas categorías corresponden a métodos de obtención automatizada de datos. Los resultados de esta encuesta se presentan en figura 14. Además, los agricultores en España utilizan una mayor cantidad de sensores para el análisis del suelo en sus instalaciones, en comparación con sus homólogos europeos (i.e., fertilizantes y agua). Al comparar la recolección de datos en la agricultura española con la media de la Unión

Europea, se observa que la recolección de datos de las parcelas es mayor que la media europea, tanto manual como automatizada. En este sentido, se puede identificar que el sector agrario español muestra un mayor interés por conocer el estado de sus parcelas, dirigidas a mejorar la eficiencia en los procesos productivos. Uno de los ejemplos más significativos es la aplicación de fertilizantes.



**Figura 14. Recolección de información en las explotaciones agrícolas europea (%).**

Fuente: Comisión Europea (2025)

El 19,0 % de las personas del sector de regadío utilizan aplicaciones móviles para el cálculo de la dotación del agua de riego y menos proporción los fertilizantes a aplicar. Solo el 13,5 % del sector de regadío utilizan herramientas más sofisticadas destinadas al apoyo del telecontrol del riego. Una buena parte de los agricultores que usan herramientas digitales de control del uso del agua son aquellos que presentan una mayor tecnificación de sus explotaciones y tienen, por tanto, una gran predisposición a implementar cualquier tecnología.

El 32 % de las explotaciones han realizado inversiones en este ámbito, en comparación con el 20 % del conjunto de la Unión Europea. Esta diferencia refleja un fuerte interés, lo que les permite optimizar el uso de insumos y reducir el impacto ambiental a los agricultores españoles.

El principal canal de transferencia de innovaciones en el sector agrario son las cooperativas agroalimentarias. Estos centros suelen contar con instalaciones para el suministro de productos, servicios e insumos destinados a los agricultores como fertilizantes, semillas y maquinaria, y asesoramiento técnico. Además, el personal de este sector tiende a confiar más en estas cooperativas, ya que mantienen un contacto frecuente con ellas y encuentran en estos centros no solo productos, sino también una red de apoyo y conocimiento. Este vínculo facilita la adopción de nuevas tecnologías y prácticas sostenibles, ya que las cooperativas actúan como

mediadoras entre los avances científicos y las necesidades prácticas del campo, contribuyendo al desarrollo de una agricultura más eficiente y respetuosa con el medioambiente. En segundo lugar, en el sector agrario se posiciona el mercado externo, que juega un papel crucial en la adopción de innovaciones, ya que las exigencias internacionales y la competencia global impulsan al sector agrícola a modernizar sus prácticas. Le siguen las conferencias, revistas y comunidades digitales. Por último, se encuentran las fuentes institucionales como universidades, centros de investigación y organismos gubernamentales que, aunque más formales y menos accesibles para algunas personas del sector agrícola, son fundamentales en la generación y validación científica de las innovaciones.

Cuando hay una nueva tecnología que se introduce en los procesos productivos hay siempre un proceso de adopción, existe un modelo denominado de Rogers. En este sentido, podemos observar cómo estadísticamente se representan según una distribución normal, con los siguientes grupos: innovadores, visionarios, pragmáticos, conservadores y escépticos (figura 15).

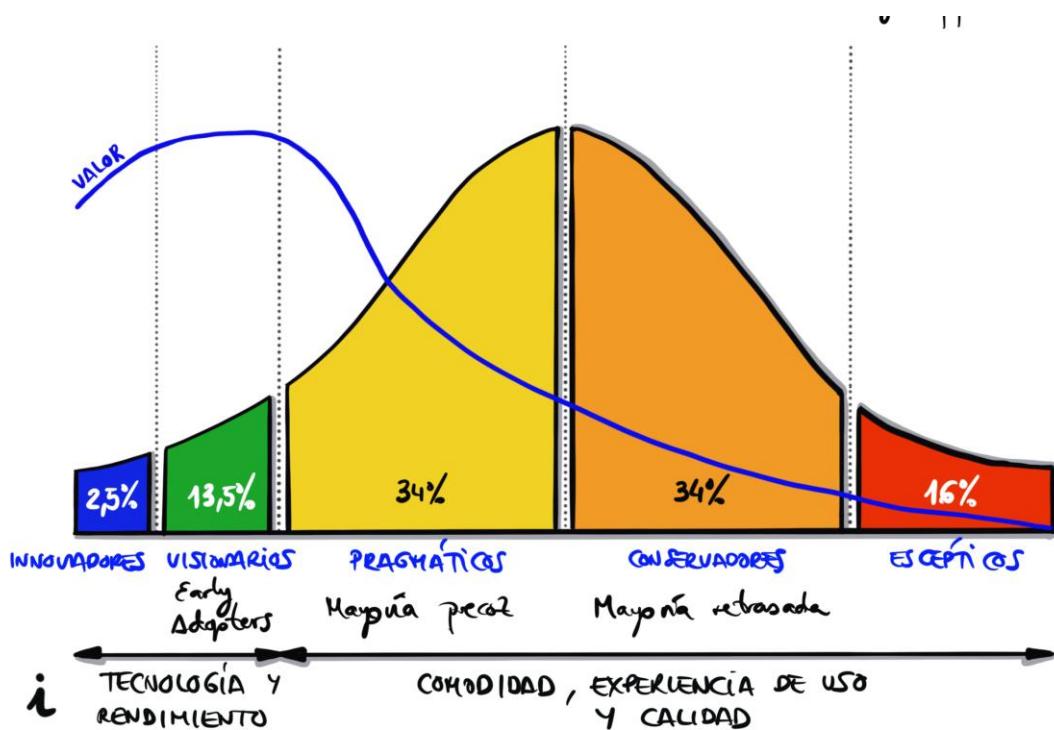


Figura 15. Adopción de tecnología según modelo de Roger

Analicemos cada uno de ellos con mayor detalle para que de esta manera entendamos a que grupo podemos identificarnos.

*Innovadores:* representan el 2,5% de la población. Son entusiastas de la tecnología. Están dispuestos a pagar por la última novedad. Obviamente asumen el riesgo de

ser los primeros. Son considerados unos auténticos frikis accediendo a lo último de lo último.

*Visionarios*, o early adopters: son aproximadamente el 13,5% de la población. Éstos prueban lo último en cuanto pueden. La cualidad clave es que pueden marcar tendencia, nota básica para entenderlos primero. Este grupo es clave cuando estamos buscando un modelo de negocio.

*Pragmáticos*: representan el 34% de la población aproximadamente. Adopta la innovación en la medida que la copia de los early adopters. Son clave en época de crecimiento, porque representan una parte importante del mercado. Este grupo es clave cuando estamos ejecutando un modelo de negocio.

*Conservadores*: también son el 34% aproximadamente de la población, y por lo tanto, un grupo muy numeroso. Adopta la innovación cuando ya lo tiene la gran mayoría. Suelen tener menor poder adquisitivo, y responden, como nos podemos imaginar, de forma más tardía que los pragmáticos.

*Escépticos*: los más tradicionales, y, por tanto, muy contrarios al cambio. Bien por clase social, bien por edad, no suelen ser consumidores de nuevos productos, salvo excepciones.

Entre los dos primeros grupos y los pragmáticos existe la brecha digital que es necesario salvar. En el caso de la agricultura y en particular del regadío ayudará a salvar dicha brecha aspectos como los que se han comentado antes: el asesoramiento a través de sus organizaciones, la fiabilidad de la tecnología y de las empresas que los suministran, la formación, el coste y el aporte de forma clara de un valor añadido.

Otro aspecto para destacar es que la adopción masiva requiere abordar la formación, la ética, los riesgos, el uso responsable, la trasparencia, la incorporación de las líneas de pensamiento y la ciberseguridad. Es crítico diferenciar entre el entrenamiento de los modelos (que requiere grandes volúmenes de datos y la supervisión experta) y su uso (que debe ser intuitivo pero robusto).

Además, en un entorno de agentes autónomos, los procesos de automatización y la verificación y acreditación de usuarios son ineludibles. Tecnologías como Proof of Personhood aseguran que las órdenes críticas (por ejemplo abrir compuertas de una presa) sean emitidas por humanos verificados y no por bots maliciosos o alucinaciones de la IA. La ingeniería de las preguntas “Ingeniería del prompt” y la “curación” de los modelos se convierten en nuevas competencias profesionales esenciales para los ingenieros, asegurando que la IA actúe dentro de los límites del conocimiento agronómico validado.

## 8. Casos de uso

Pese a las dificultades y limitaciones del sector agrario a incorporar los avances tecnológicos respecto a otros sectores, cada vez es más frecuente los casos de

éxito de aplicaciones realizadas en explotaciones comerciales. Presentemos a continuación algunos de ellos.

### 8.1 Riego de precisión

Se trata de un riego y para controlar y actuar sobre el mismo se ha desarrollado una arquitectura basada en una plataforma IoT que se divide en tres capas distintas e independientes, interconectadas mediante diversas API (Figura 16). Esta arquitectura se compone de un conjunto de microservicios que realizan una tarea específica. El componente central de la plataforma es Orion Context Broker, responsable de conectar los diferentes microservicios mediante la misma API. Este tipo de arquitectura aumenta la escalabilidad y la seguridad del sistema, ya que permite la creación de nuevos servicios que realizan funcionalidades específicas sin afectar a los ya existentes.

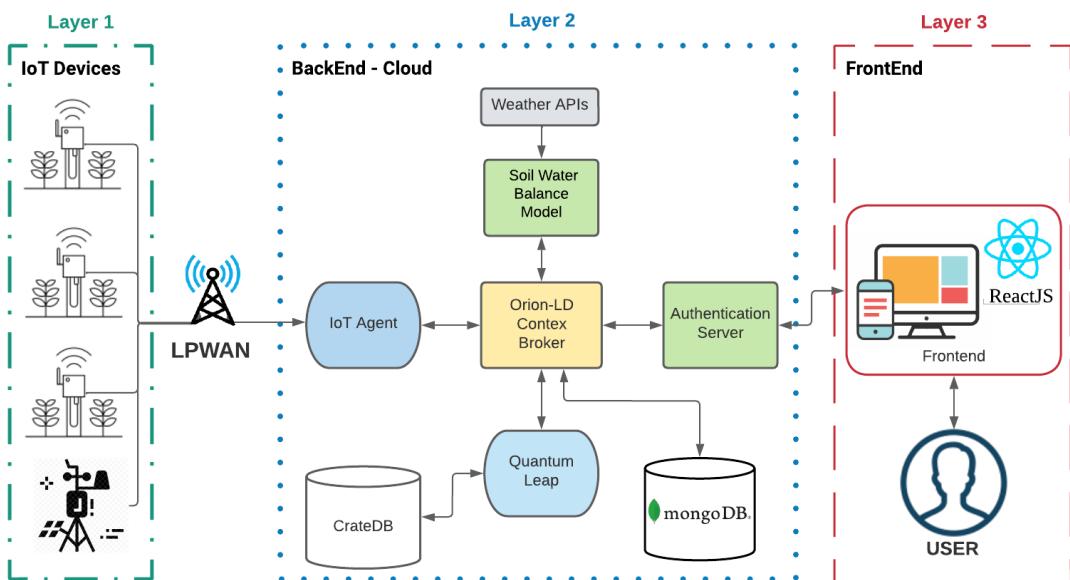


Figure 16. Arquitectura de la plataforma IoT de un riego de precisión

Fuente: Puig et al. 2025

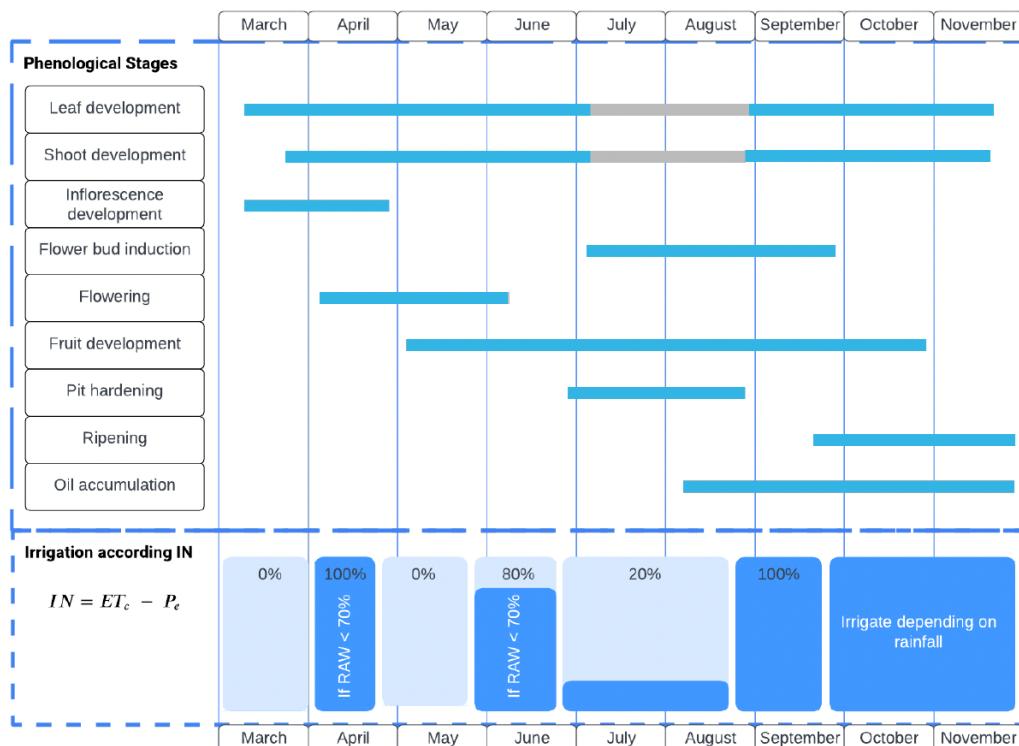
El modelo de riego se encarga de calcular la cantidad de agua que necesita el cultivo y el mejor momento para aplicarla. Si bien puede utilizarse con cualquier método de riego, en el caso que sea riego por goteo permite calcular las dimensiones del bulbo húmedo.

La aplicación dispone de un modelo suelo-agua-cultivo ejecuta dos tipos de simulación. El primero calcula el balance hídrico del suelo de años anteriores. Se

puede elegir entre realizar un balance hídrico simulando un año específico o utilizando el promedio de los valores climáticos de los últimos 20 años. Se puede cambiar las estrategias de riego y elegir la que mejor se adapta a las necesidades. El segundo tipo utiliza las previsiones meteorológicas para estimar las necesidades hídricas del cultivo en los próximos siete días y aplicar la estrategia de riego más eficiente posible. Todos los datos meteorológicos pueden obtenerse mediante una estación meteorológica en la explotación o una API meteorológica externa, como AEMET y elTiempo.es, dos servicios meteorológicos que operan en España.

El sistema es una plataforma multicapa compuesta por una serie de dispositivos inteligentes conectados a una plataforma IoT basada en una arquitectura de microservicios. La plataforma utiliza el marco FIWARE junto con componentes personalizados y puede implementarse mediante computación en el borde o sistemas en la nube. Esto permite adaptarla a las necesidades del agricultor, reduciendo costes y aumentando la seguridad.

La aplicación se ha ejecutado para un riego de olivar ajustando el riego a un riego deficitario controlado (figura 17)



**Figura 17. Riego deficitario para olivar super intensivo con 60% de las necesidades.** Fuente: Puig et al. 2022

## 8.2 Gemelo Digital para un riego

Se trata de un Riego Inteligente mediante Gemelos Digitales (RIGE) la cual es una herramienta desarrollada como un plugin para el sistema de información geográfica QGIS y elaborada con lenguaje de programación Python. La elección del programa QGIS como entorno de trabajo se debe al marcado carácter geoespacial de los sistemas de riego. Las condiciones de trabajo de un sistema de riego dependen, entre otros factores, de la topografía, así como el diseño y la configuración espacial de la red de riego. Al ser QGIS un SIG permite integrar capas de información geoespacial y asociarlas a sensores, tipos de suelo, datos climáticos, red de riego, topografía, etc... lo que lo convierte en un entorno idóneo para la generación, simulación y evaluación de GDs.

La herramienta RIGE es un sistema soporte de decisión de última generación en gestión de riego. Integra la modelización, simulación y conexión en tiempo real con el exterior, así como el análisis para proporcionar la mejor información disponible que permita optimizar el proceso de toma de decisiones en cuanto al manejo del riego.

La figura 18 muestra la arquitectura del gemelo de riego generado con RIGE. La parte física del GD está compuesta por todos los elementos reales del entorno de riego (cultivo, suelo, clima y sistema de riego) y todos los sensores, fuentes de datos y sistemas de comunicación que permiten la conexión al entorno físico. La parte digital del gemelo está formada por dos capas; una de procesamiento y análisis y otra de visualización. La capa de “procesamiento y análisis” se encarga de procesar toda la información que llega (de los sensores locales, datos climáticos y cierta información de entrada sobre el tipo de cultivo y las características del sistema de riego) mediante simulación hidráulica y en el cálculo de la programación del riego, para distintas opciones de manejo, creando múltiples escenarios de simulación. En la capa de “visualización”, el usuario puede interactuar con la herramienta desde el entorno de QGIS, definir escenario y visualizar los resultados.

Para la conexión con la parte física, RIGE implementa una librería propia para conectar en tiempo real el gemelo digital con los sensores IoT instalados en campo (en el suelo y el sistema de riego) y las redes de datos climáticos. La parte de la librería encargada de la conexión con los sensores instalados en la finca de estudio encapsula las diferentes APIs (Application Programming Interface) comerciales propias de estos sensores, para ofrecer diversas posibilidades de visualización y gestión de la información en tiempo real desde el entorno de QGIS y su inclusión en el proceso de toma de decisiones. Del mismo modo y dado que las variables agroclimáticas son esenciales para obtener una programación de riego fiable y precisa; RIGE (Riego inteligente mediante gemelos digitales), a partir de la ubicación de la parcela, es capaz de acceder automáticamente a las APIs de distintos proveedores de datos climáticos (históricos y predictivos) para España, y a nivel mundial. Para España la fuente de datos climáticos históricos es la red de SIAR, mientras que las predicciones se toman de AEMET. En el caso de Francia y Portugal la fuente de datos única es OpenMeteo.

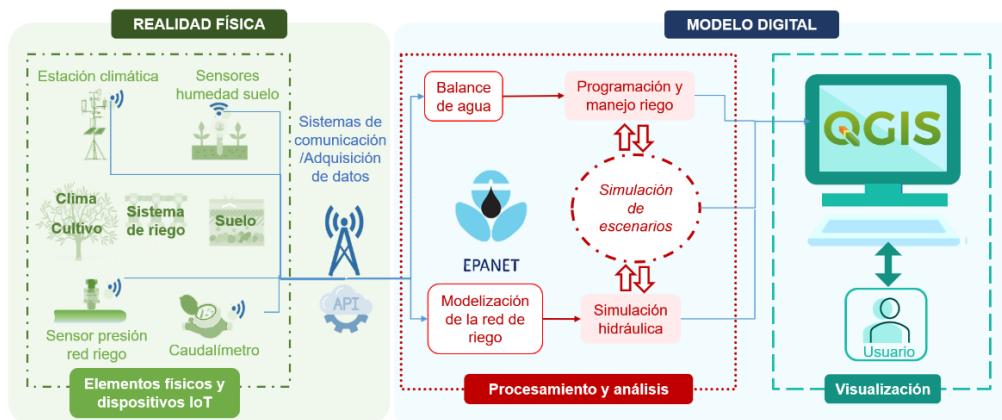


Figura 18. Arquitectura del plugin RIGE

Fuente: Flores et al., 2025

Mediante la introducción de un conjunto de datos de entrada (posición del hidrante de riego, ubicación y orientación de las tuberías, características y marco de los goteros) que caracterizan el sistema de riego, RIGE genera automáticamente el modelo hidráulico y simula su comportamiento mediante el simulador hidráulico Epanet (Rossman, 2000), que al igual que QGIS es un software libre.

Al introducir esta información RIGE ha generado de forma automática el modelo hidráulico (modelo digital) de la red riego. Desde la vista de mapa de QGIS (figura 19), se puede visualizar la posición geográfica de la instalación de riego y, clicando sobre las capas de cada uno de los elementos generados (nodos, tuberías, hidrantes y válvulas), es posible consultar los parámetros hidráulicos del sistema en las condiciones de trabajo inicialmente asignadas a la red.

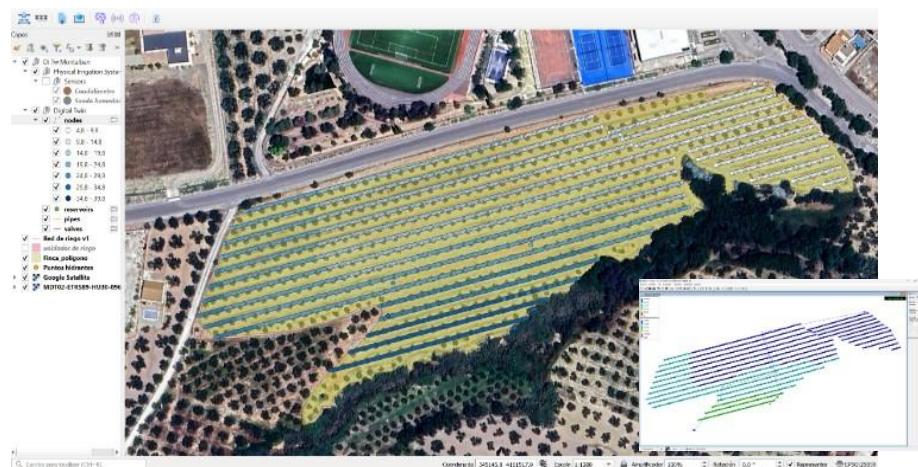


Figura 19. Visualización del modelo hidráulico de la red de riego (ventana de EPANET) desde la vista de mapa de QGIS

Tras generar el modelo digital de la red de riego, y antes de simular es necesario establecer la conexión a los sensores de la finca mediante la opción “Conexión sistema de riego físico”. En esta opción el usuario selecciona a su proveedor de datos, introduce el usuario y contraseña de su cuenta con dicho proveedor y selecciona y añade los sensores y métricas que le interesan.

Después de establecer la conexión del modelo digital con el mundo físico a través de los sensores, RIGE permite simular distintos escenarios. Por tanto, RIGE es una herramienta para la gestión óptima del riego basada en decisiones informadas, que facilita la implementación de riegos de precisión para mejorar la sostenibilidad de las explotaciones regadío con el uso de herramientas digitales.

### 8.3 Gemelo Digital en una estación de bombeo

Una manera innovadora para optimizar el consumo energético en sistemas de distribución de agua es mediante la implementación de gemelos digitales y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). La estrategia se basa en el control dinámico de la consigna de presión en las estaciones de bombeo, sustituyendo el enfoque tradicional de consignas fijas por una regulación adaptativa basada en las condiciones operativas en tiempo real.

Generalmente, las estaciones de bombeo con riego a la demanda se diseñan para que todas las acometidas de las parcelas dispongan de unos valores mínimos de presión y caudal acordados por la comunidad de regantes. Esta manera de operar se consigue con un correcto dimensionamiento de la red, y el establecimiento de una consigna fija de presión en cabecera, que el sistema de bombeo consigue mantener para cualquier combinación de hidrantes abiertos, ajustando el número de bombas activas y su régimen de funcionamiento. Sin embargo, este modelo de gestión supone un coste energético elevado, que, en la actualidad, puede optimizarse mediante las nuevas tecnologías emergentes de sensorización y transmisión de datos en tiempo real.

El modelo de control dinámico de la presión en el bombeo optimiza el consumo energético y garantiza la presión requerida únicamente en los hidrantes que se encuentren operando en cualquier instante. El conjunto de hidrantes que demandan mayor presión de cabecera en la estación de bombeo, serán monitorizados en tiempo real, de manera que aquellos que se encuentren cerrados, detectados mediante el sensor de pulsos, posibilitarán ajustar a la baja la consigna de presión del bombeo. En caso contrario, cuando se produzca la apertura de un hidrante que demande mayor energía, se establecerá una nueva consigna de presión en la estación de bombeo para elevar de nuevo dicha presión y satisfacer su demanda con los parámetros de diseño. Por tanto, este control dinámico permitirá ajustar tanto al alza como a la baja la consigna de presión del bombeo, en la medida que los hidrantes críticos se activen o se cierren respectivamente.

La implementación de los actuales sistemas de monitorización IoT permite tomar decisiones basadas en datos en tiempo real. Un sistema de monitorización basado

en sensores IoT aplicado a sistemas de distribución de agua debe incluir sensores para medir las principales variables hidráulicas, un sistema de comunicaciones adecuado para las condiciones de las redes de riego, que suelen ocupar amplias zonas donde la señal de la tecnología móvil no es adecuada, y una interfaz de usuario amigable para el análisis y visualización de los datos (Team, Q.D. Quantum GIS Available online: <http://qgis.org>)

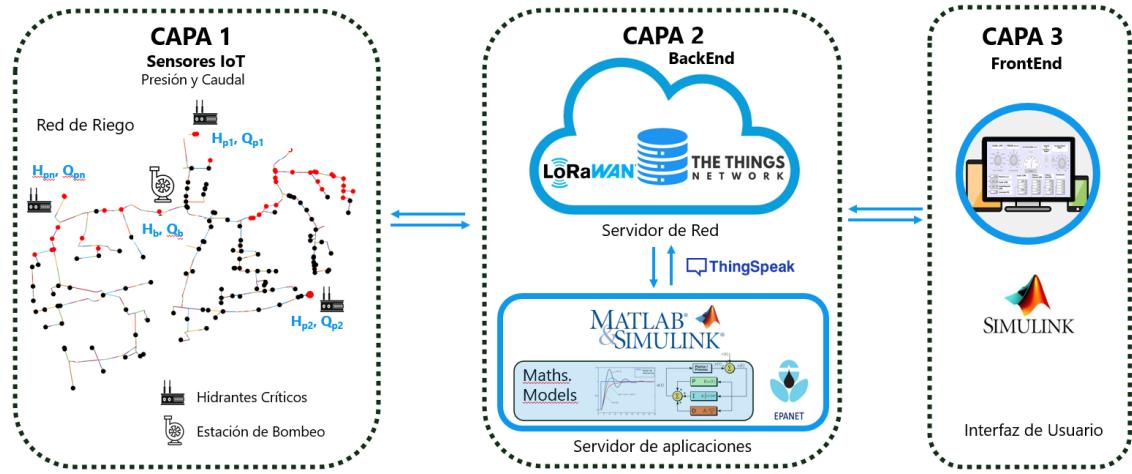


Figura 20. Arquitectura de la plataforma IoT.

Fuente: Fonollá et al., 2025

El gemelo digital ha sido realizado mediante el paquete informático *MatLab*® y su complemento *Simulink*®, en que han sido implementados los modelos matemáticos para la optimización energética de la estación de bombeo y para la simulación de escenarios.

El algoritmo que se ha implementado en el gemelo digital para optimizar el consumo de energía en la estación de bombeo comprende dos etapas claramente diferenciadas:

1. Establece una consigna dinámica en función de los hidrantes críticos abiertos.
2. Devuelve una lista de combinaciones de bombas compatibles con los requerimientos de caudal y presión, ordenada de menor potencia y mayor rendimiento.

El gemelo proporciona la combinación óptima de bombas y su régimen de funcionamiento que minimiza la potencia total del bombeo.

El hecho de considerar una presión de bombeo dinámica, cambiante con cada escenario, en vez de fija una consigna fija, tal y como se opera en la actualidad, da como resultado una menor potencia total de bombeo.

La implementación de gemelos digitales con modelos de control dinámico, basados en consignas de presión variables, en estaciones de bombeo de redes de distribución de agua, permite optimizar el consumo energético en sistemas hidráulicos presurizados. Esta estrategia adaptativa ajusta la presión en tiempo real

en función de los puntos críticos activos, mejorando la eficiencia energética. En determinadas situaciones, en la que ciertos hidrantes críticos no se encontraban operativos, ha sido posible reducir la potencia del bombeo en un 15%.

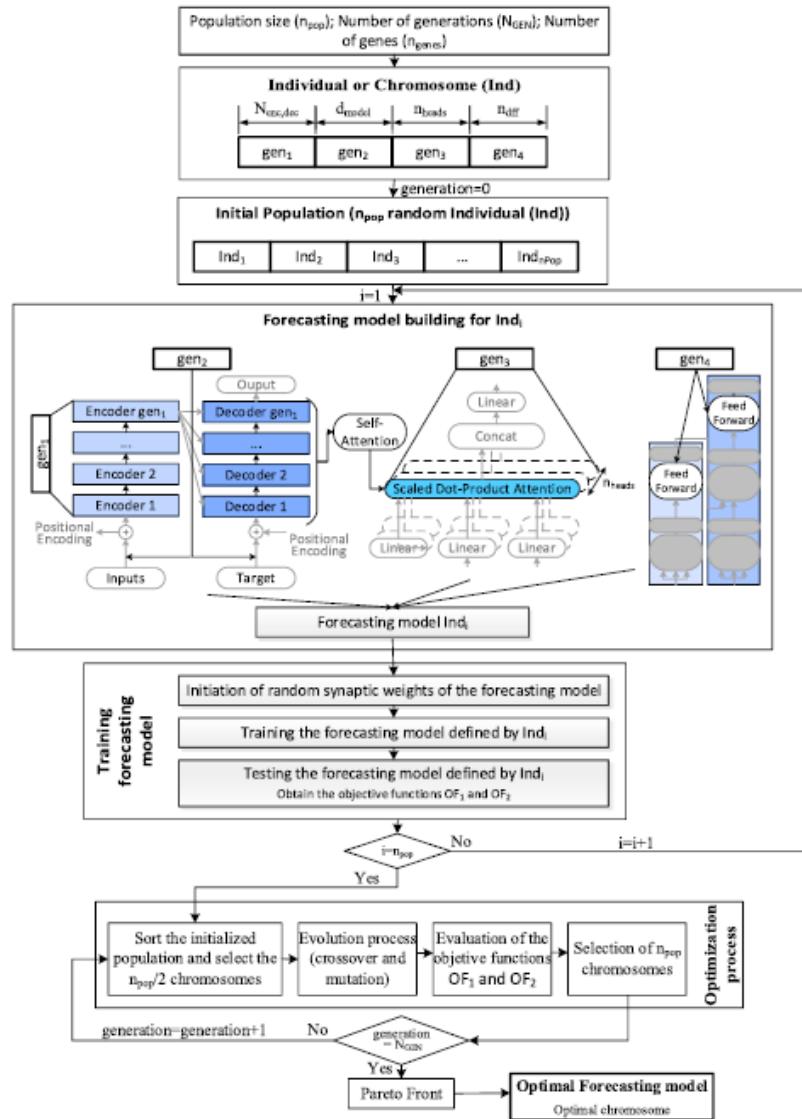
La simulación de escenarios en tiempo real mediante gemelos digitales y la aplicación de las nuevas tecnologías emergentes como Internet de las cosas (IoT) y el análisis de cada vez mayor número de datos, (desarrollo big data) de la Agricultura 4.0 son una valiosa herramienta para la digitalización de los sistemas agrícolas.

#### 8.4 Modelo predictivo de demanda de agua

Uno de los grandes retos actuales es poder predecir cuánta agua necesitarán los cultivos y cómo la usarán los agricultores. Contar con esta información permite planificar mejor la distribución del agua y evitar pérdidas, ajustando el suministro a las necesidades reales de cada zona y cultivo. Sin embargo, esta tarea es compleja, ya que depende de muchos factores: el clima, el tipo de suelo, las prácticas agrícolas e incluso el comportamiento humano.

Para afrontar este desafío, en los últimos años se están aplicando técnicas de inteligencia artificial capaces de mejorar las predicciones. Entre ellas, destacan los Transformers, un tipo de red neuronal desarrollada por Google en 2017, que ha revolucionado el análisis de datos y la predicción de series temporales (figura 21). Estos Transformers son una de las clases más nuevas y potentes de modelos inventados hasta la fecha. Están impulsando una ola de avances en machine learning que algunos han apodado como la «IA de transformer». En agosto de 2021 los investigadores de Stanford llamaron a los Transformers los «modelos de base» porque ven que impulsan un cambio de paradigma en la IA. Los Transformers están traduciendo texto y habla casi en tiempo real, lo que permite el acceso a reuniones y aulas para diversos asistentes con discapacidades auditivas. El laboratorio de OpenAI desarrolló el Transformer Generativo Previamente Entrenado (GPT) conocido como Chat GPT.

El modelo fue validado en la Comunidad de Regantes del Canal del Zújar y se basa en una arquitectura de tipo Transformer, optimizada mediante algoritmos genéticos. Esta combinación permitió mejorar la representatividad y precisión del mejor modelo previo en un 6,1 % y un 89,8 %, respectivamente. La correcta optimización de los hiperparámetros fue clave para lograr una generalización adecuada del modelo, demostrando que la elección de la arquitectura influye directamente en la precisión. Con 1,75 millones de parámetros, apenas un 16,7 % más denso que modelos anteriores, el sistema alcanzó una predicción del 99,9 % de los escenarios, con un error medio del 2,10 % (figura 22).



**Figura 21. Modelo transformer optimizado mediante algoritmos genéticos**

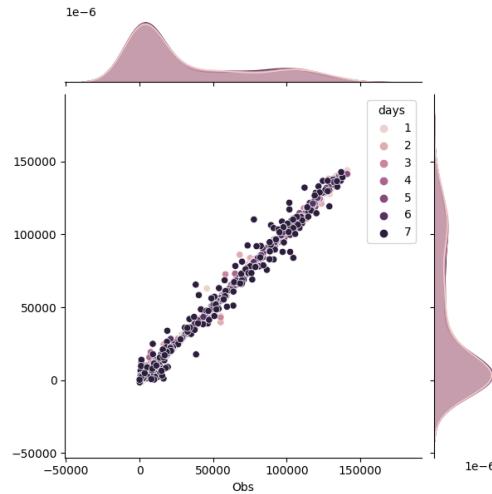
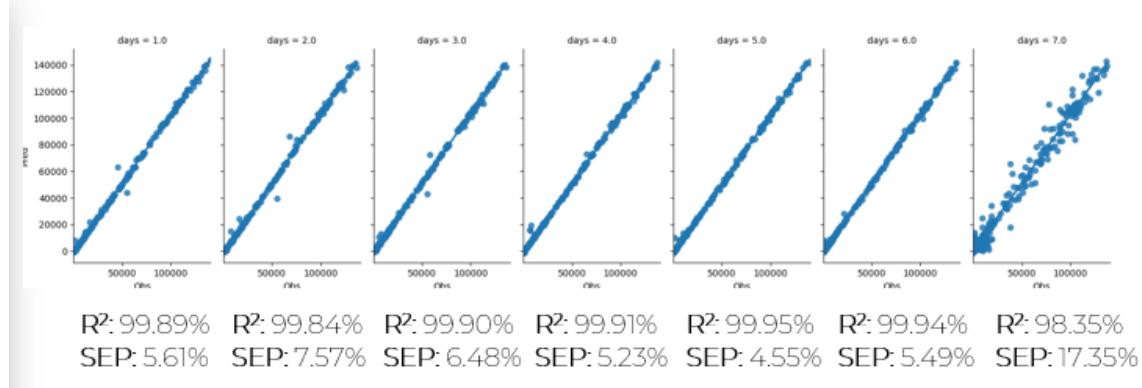
Gracias a esta tecnología y a este nivel de fiabilidad, el grupo de investigación de Hidráulica y Riegos de la Universidad de Córdoba ha desarrollado un modelo capaz de anticipar la demanda de agua de riego con gran precisión. Gracias a ello, se facilita la planificación de recursos hídricos y energéticos, reduciendo costes y mejorando la sostenibilidad. En un escenario marcado por la escasez de agua y los altos precios de la energía, esta innovación representa un avance importante hacia una gestión más inteligente, eficiente y resiliente del agua en la agricultura moderna.

El área de estudio del modelo de predicción desarrollado se centra en la Comunidad de Regantes Canal del Zújar en Don Benito (Badajoz). Los datos diarios de demanda real de agua de riego a nivel de hidrante que se utilizaron para el entrenamiento y testeo del modelo predictivo desarrollado abarcan desde las campañas de riego de 2015 a 2022.

Para este trabajo, se seleccionó el Sector II de dicha comunidad de regantes, que abarca un área de 2691 ha de riego y está compuesto por 191 hidrantes. Los cultivos principales en este sector son el tomate, maíz y arroz, representando el 90% del área total regada. El sistema de riego utilizado es por goteo para los cultivos de tomate y maíz, mientras que el arroz se riega por inundación. Cada hidrante está equipado con un medidor de flujo que registra automáticamente el volumen de agua aplicada cada hora.

El conjunto de datos completo, que contiene la demanda real diaria de agua de riego, incluye un total de 1849 medidas correspondientes a todas las campañas de riego estudiadas. Este conjunto de datos se dividió aleatoriamente en dos subconjuntos: un conjunto de entrenamiento que abarca el 80% del total de las medidas, y un conjunto de prueba que cubre el 20% restante.

El desarrollo de herramientas capaces de anticipar la demanda de agua de riego, sin limitar la libertad del agricultor, es fundamental en un contexto de escasez hídrica y dependencia energética. La inteligencia artificial, y en particular el aprendizaje profundo, ofrece un gran potencial para mejorar la gestión del agua mediante modelos que aprenden del comportamiento real de las comunidades de regantes.



**Figura 22. Diagrama de dispersión entre la demanda de agua de riego observada (real) y predicha, distribución de densidades y valores SEP (error estándar de predicción) para la estimación a 7 días (t+1, ..., t+7) por el modelo predictivo**

Fuente: González et al. 2024

## 9. Conclusiones

La agricultura de precisión y en particular el riego de precisión es una metodología que busca optimizar el rendimiento de los cultivos y mejorar la toma de decisiones mediante el uso de sensores avanzados y herramientas tecnológicas de análisis. La integración de los procesos de agentes y la computación en la nube representa el salto cualitativo hacia una agricultura verdaderamente autónoma y resiliente.

Este enfoque innovador y digital permite aumentar la producción, reducir la demanda de mano de obra y gestionar de manera más eficiente el uso de fertilizantes y los procesos de riego

La inteligencia artificial representa una oportunidad estratégica para transformar la gestión del riego de aguas tanto superficiales como subterráneas. Al incorporar redes funcionales, modelos compatibles con las últimas arquitecturas de Transformers y estándares de interoperabilidad, transformamos el agua en un activo gestionado con alta precisión.

Al integrar datos, sensores y modelos predictivos, la IA convierte el agua y la energía en un recurso gestionado con precisión y sostenibilidad, beneficiando tanto a los agricultores como al medio ambiente.

La inteligencia artificial tiene el potencial de revolucionar la gestión del agua al permitir predicciones precisas y una monitorización efectiva de los recursos hídricos, especialmente en respuesta a los desafíos del cambio climático.

En un planeta con recursos limitados, innovar en cómo regamos es tan importante como innovar en lo que cultivamos.

La combinación de IA con tecnologías emergentes como gemelos digitales y aprendizaje automático avanzado permitirá una gestión integral e inteligente del agua.

En el futuro, los sistemas agrícolas podrán autorregularse, anticipando sequías y ajustando consumos de manera autónoma.

Adicionalmente, los gemelos digitales proporcionan a los agricultores herramientas avanzadas que les permiten anticipar problemas como el estrés hídrico o la aparición de plagas, permitiendo una intervención proactiva y predictiva para minimizar los impactos posibles negativos en los cultivos.

Estos gemelos permiten la creación de réplicas virtuales de cultivos leñosos y hortícolas, integrando datos en tiempo real provenientes de sensores, drones y sistemas de monitorización en campo.

La adopción de la tecnología en el sector del regadío es cada vez más generalizada y se prevé que en un futuro todas las decisiones realizadas con el riego sean informadas a través de esta.

## 10. Referencias

- Alves RG, Maia RF, Lima F. (2023). Development of a Digital Twin for Smart Farming: Irrigation Management System for Water Saving. *J Clean Prod*, 388, 135920
- Ballesteros R, Ortega JF, Moreno M A. (2016). FORETo: new software for reference evapotranspiration forecasting. *J. Arid Environ*. 124, 128–141
- Bellvert J, Pelechá A, Pamies-Sans M, Virgili J, Torres M, Casadesús J. (2023). Assimilation of Sentinel-2 Biophysical Variables into a Digital Twin for the Automated Irrigation Scheduling of a Vineyard. *Water (Switzerland)*
- Berbel J, Martínez J, Espinosa J. (2025). Las claves del regadío español 2025. Plataforma Tierra. Cajamar
- Cai Y, Guan K, Peng J, Wang S, Seifert, C, Wardlow B, Li Z. (2018). A highperformance and in-season classification system of field-level crop types using timeseries Landsat data and a machine learning approach. *Remote Sens. Environ*. 210, 35–47
- Camacho Poyato E, Rodríguez Díaz JA, Montesinos Barrios P. (2017). Ahorro de agua y consumo de energía en la modernización de regadíos. Efectos de la modernización de regadíos en España. CAJAMAR
- Chakhar A, Ortega-Terol, D, Hernandez-López D, Ballesteros R, Ortega JF, Colkesen I, Kavzoglu T. (2017). Ensemble-based canonical correlation forest (CCF) for land use and land cover classification using sentinel-2 and Landsat OLI imagery. *Remote Sens. Lett*. 8, 1082–1091
- Clementi M, Dessì V, Podestà GM, Chien SC, Wei BAT, Lucchi E. (2024). GIS-Based Digital Twin Model for Solar Radiation Mapping to Support Sustainable Urban Agriculture Design. *Sustainability (Switzerland)*
- Comisión Europea. (2025). The state of digitalisation in EU agriculture
- Corominas J. (2010). Agua y Energía en el riego en la época de la Sostenibilidad. *Ingeniería del Agua* 17(3); pp. 219-233.

Durgun Y O, Gobin A, Van De Kerchove R, Tychon B. (2016). Crop area mapping using 100-m Proba-V time series. *Remote Sens.* 8, 1–23.

Endsley, M. (2017). From here to autonomy: Lessons learned from human-automation research. *Human factors*, 59(1), 5–27.

ESYRCE (2024). Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>

Eurostat (2025). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture>

Ferrer Y, Casadesus J, Navas JF. (2023). Automatización Del Riego a Través de Gemelos Digitales, Una Realidad. *iagua-Magazine* 2023, 190–193.

Flores Cayuela C, González R, Camacho E, Montesinos P. (2025). Herramienta para la generación de gemelos digitales de sistemas de riego en QGIS. *XL Congreso Nacional de Riegos*.

Fonollá A, González Perea R, Rodríguez Díaz JA, Camacho E (2025). Modelización y gestión automática de sistemas de impulsión en redes de distribución de agua. Bases para un gemelo digital. *XL Congreso Nacional de Riegos*.

Gómez-Limón JA (2008). “El regadío en España”. *Papeles de Economía Española*, 117: 86-109.

González Perea R, Camacho E, Montesinos P, Rodríguez JA. (2015). Irrigation demand forecasting using artificial neuro-genetic networks. *Water Resour. Manag.* 29, 5551–5567.

González Perea R (2017). Optimum Management of Pressurized Irrigation Networks at Different Scales Using Artificial Intelligent Techniques. *University of Cordoba*.

González Perea R, Camacho Poyato E, Montesinos P, Rodríguez Díaz JA. (2018). Prediction of applied irrigation depths at farm level using artificial intelligence techniques. *Agric. Water Manag.* 206, 229–240

González Perea R, Camacho Poyato E, Rodríguez Díaz JA. (2025). Attention is all water need: Multistep time series irrigation water demand forecasting in irrigation districts. *Computers and Electronics in Agriculture* 218. 108723

Hansen MC, Loveland TR. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 122, 66–74.

INE. (2020). Encuesta sobre el uso del agua

ISO. (2023) ISO/IEC 30173. Digital twin- Concept and terminology

Kaur S (2019). Artificial intelligence and internet of things in agriculture–A survey. *Think India Journal*, 22(30), 1410-1416.

Kumar S, Patil RR, Kumawat V, Rai Y, Krishnan N, Singh SK. (2021). A Bibliometric Analysis of Plant Disease Classification with Artificial Intelligence Using Convolutional Neural Network. *vol. 5777. Library Philosophy Pract.*;1–14.

MAPA. (2025). <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/innovacion-medio-rural/digitalizacion/sub-observatorio>

Moreno MA. (2020). Assessing the accuracy of multiple classification algorithms for crop classification using landsat-8 and sentinel-2 data. *Remote Sens.* 12, 1–19.

Observatorio de la Digitalización del Sector Agroalimentario Español. (2024). La transformación digital en la Agricultura Española.

Piedelobo L, Ortega-Terol D, del Pozo S, Hernández-López D, Ballesteros R, Moreno M, Molina JL, González-Aguilera D. (2018). HidroMap: a new tool for irrigation monitoring and management using free satellite imagery. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 7, 220

Puig F, Rodríguez Díaz JA, Soriano MA (2022). Development of a Low-Cost Open-Source Platform for Smart Irrigation Systems. *Agronomy*, 12 (12), 2909

Puig Pérez-Barquero, F. (2025). Aplicación de las nuevas tecnologías para la gestión del riego de precisión. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba

Pulido-Calvo I, Gutiérrez-Estrada JC. (2009). Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. *Biosyst. Eng.* 102, 202–218.

Purcell W, Neubauer T, Mallinger K (2023). Digital Twins in Agriculture: Challenges and Opportunities for Environmental Sustainability. *Curr Opin Environ Sustain*, 61, 101252,

Rane J, Kaya O M, Rane N L (2024). Smart farming using artificial intelligence, machine learning, deep learning, and ChatGPT: Applications, opportunities, challenges, and future directions. In J. Rane, "O. M. Kaya, & N. L. Rane (Eds.), Generative artificial intelligence in agriculture, education, and business (pp. 218–272). Deep Science Publishing.

Rossmann L (2000). Epanet 2. Users Manual. Natl. Risk Manag. Res. Lab. USEPA 1, 1–200.

Sales Dantas R A, Marotti Togneri R, Cristiano Prati R, Kamienski CA. (2025). A review of Smart Irrigation. *Biosystems Engineering* 257: 104220

Shelestov A, Lavreniuk M, Kussul N, Novikov A, Skakun S. (2017). Exploring Google earth engine platform for big data processing: classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Front. Earth Sci.* 5, 1–10.

Team, Q.D. Quantum GIS Available online: <http://qgis.org>.

Wu J, Lai Z, Chen S, Tao R, Zhao P, Hovakimyan N (2024). The new agronomists: Language models are experts in crop management. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (pp. 5346–5356).

Zhang J. (2020). Research on digital image processing and recognition technology of weeds in maize seedling stage based on artificial intelligence. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1648, No. 4, p. 042058). IOP Publishing.

Zhang R, Zhu H, Chang Q. (2025). A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. Agriculture, 903