



Emilio Camacho Poyato  
y Rafael González Perea  
Universidad de Córdoba\*

## La gestión inteligente del agua de riego a través de la tecnología

■ En este artículo, sus autores analizan el binomio agua/energía en el regadío agrícola, y la importancia de utilizar las nuevas tecnologías digitales para mejorar la eficiencia. Tras el importante avance que se ha producido en España en el ahorro de agua gracias a la modernización del regadío desarrollada desde final de los años 1990, los autores consideran ahora urgente utilizar las tecnologías digitales para lograr un consumo más eficiente en materia energética. En este sentido valoran las inversiones previstas dentro del Plan de Recuperación y Resiliencia de la UE, y en particular el PERTE agroalimentario y el PERTE para la digitalización del ciclo del agua.

### Palabras clave:

Regadío | Agricultura | Digitalización  
| Tecnología | Agua | Energía |  
España.

Decía Tales de Mileto, uno de los siete sabios griegos, que el agua es vida. Y es que el agua es un recurso básico y esencial para la población, la agricultura y la biodiversidad, y que preocupa por su disponibilidad. Además, hay que tener en cuenta que la población se encuentra en continuo crecimiento y que hay que satisfacer las necesidades de esta, incluidas las necesidades alimentarias, y los recursos de agua son limitados.

Además, y como ocurre en algunas áreas geográficas, entre ellas España, la disponibilidad de agua se puede ver limitada de forma coyuntural por factores climáticos y antrópicos, como es el caso de los efectos del cambio climático. Todo ello debería conducir a un uso y gestión del agua que incorpore los nuevos avances tecnológicos.

Hoy día no se comprende un análisis del agua de forma independiente, sino que hay que contemplar la relación del agua con la energía. Agua y energía constituyen un binomio insoluble, que requiere un esfuerzo importante para ser más eficiente en esa relación y en la búsqueda de energías reno-

vables que satisfagan las estrategias del *Green Deal* (Pacto Verde), que comprende el conjunto de iniciativas políticas de la Comisión Europea para hacer que la UE sea climáticamente neutral en 2050.

Uno de los principales motores de desarrollo y transformación económica es la energía, considerándose un bien básico para el conjunto de la economía. Especialmente, en los últimos años, el consumo energético a escala mundial ha experimentado un gran crecimiento. La escasez y los elevados precios de los recursos energéticos, junto con los efectos sobre el medio ambiente (emisiones de GEI), han motivado que los sectores productivos hayan intensificado sus esfuerzos para mejorar su eficiencia en el uso de la energía.

### Situación del regadío en España

El regadío en España supone un 22% de la superficie agraria cultivable (3.828.763 has) (ESYRCE, 2022) y usa un 70% del total del

### ▼ Nota

\* Los autores son miembros del Departamento de Agronomía (Unidad de Excelencia María de Maeztu).

agua. Tras el primer Plan Nacional de Regadíos de 1996 elaborado con el horizonte puesto en 2005, se han sucedido diversos planes que han transformado el riego en España. Así, se ha pasado de un 59% de riego por superficie en 1996 a un 78% de riego localizado y de aspersión en la actualidad, y en el caso de Andalucía a un 85%.

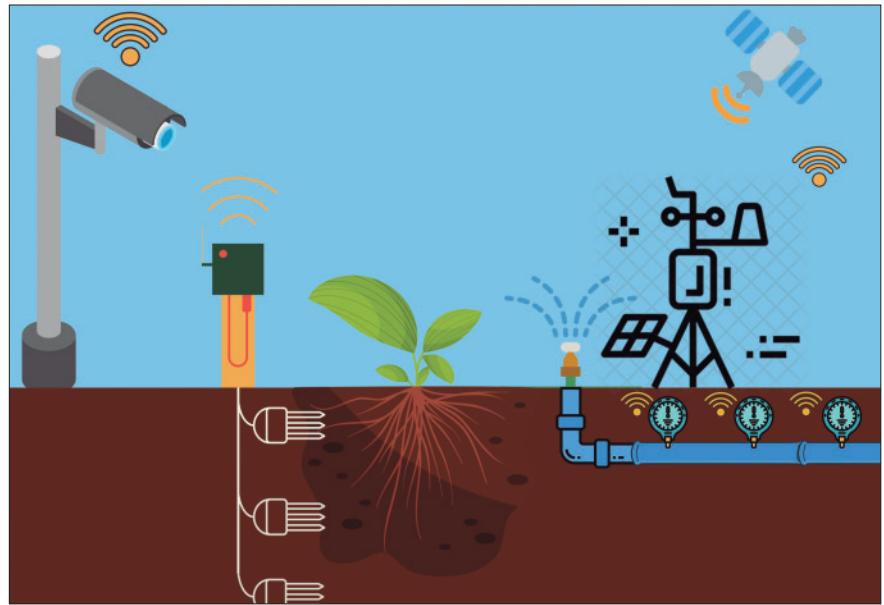
La transformación en infraestructuras está muy avanzada, aunque es cierto que aún quedan zonas pendientes de transformación. La eficiencia en el uso del agua ha aumentado de forma significativa, pasándose de riego por superficie con eficiencias inferiores al 60% y canales de conducción con eficiencias inferiores al 50%, a riegos con mayor control de agua y eficiencias próximas al 80% y conducciones cerradas con eficiencias del 90%. También ha habido una orientación del regadío hacia cultivos leñosos, fundamentalmente olivar, viñedo y otros como cítricos y almendro. En la actualidad, representan un 50% de la superficie de riego total (ESYRCE, 2022).

Pero la modernización del regadío implicaba unos requerimientos energéticos a los que no se les había prestado importancia, pues en aquel momento (mitad de los años 1990) la energía no preocupaba de manera tan relevante como ahora. Sin embargo, la liberalización del mercado de la energía y la subida de precios en los últimos años ha puesto en jaque al sector de regadío.

Bajo este escenario y en la era digital en la que nos encontramos, es el momento de actualizar la tecnología, incorporando las que son propias de nuestro tiempo, con el fin de aumentar la rentabilidad de la agricultura de regadío y de permitirnos tomar las decisiones más eficientes y eficaces sobre la base del conocimiento generado a partir de los datos científicos.

### Tecnología y gestión del riego

Nos encontramos en una era digital, que ofrece una oportunidad para la *gestión inteligente* del agua. En la última década, la gran revolución de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación (TICs), de la sensorización y de la capacidad de procesamiento automático, ha abierto nuevas posibilidades de optimización del nexo agua-energía. Siendo consciente de esta realidad,



**Hoy día no se comprende un análisis del agua de forma independiente, sino que hay que contemplar la relación del agua con la energía. Agua y energía constituyen un binomio indisoluble, que requiere un esfuerzo importante para ser más eficiente en esa relación y en la búsqueda de energías renovables que satisfagan las estrategias del Green Deal (Pacto Verde), que comprende el conjunto de iniciativas políticas de la Comisión Europea para hacer que la UE sea climáticamente neutral en 2050**

la *European Innovation Partnership on Water* (EIP Water) considera como básicas, para todas las prioridades establecidas en ella, las llamadas *tecnologías inteligentes*.

Como es conocido, la era de las TICs y la transformación digital se apoya en diversos factores: la conectividad de los elementos físicos con el mundo digital; la optimización de las comunicaciones; el acceso a los servicios y la disponibilidad de manera escalable y a bajo coste de la información en la *nube* de datos, y en el análisis y generación de conocimiento a partir de esa información. Todo esto abre un nuevo mundo de posibilidades y valores, en el que los servicios que gestionan el agua pasan de un enfoque tradicional en su toma de decisiones a enfoques predictivos y holísticos con mayor criterio y capacidad de actuar.

El *Big Data*, el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial, los sensores próximos y remotos, la administración y control de los sistemas de monitorización de datos...

se incorporan cada vez más en el sector del agua como parte de la denominada *Industria 4.0* o *Agricultura 4.0*, considerándose a tal efecto como tecnologías disruptivas. Se puede decir que dichas tecnologías están llevando a cabo un proceso de cambio más rápido que nunca, surgiendo continuamente nuevos avances y oportunidades. Esas tecnologías pueden jugar un papel crucial en la gestión del recurso hídrico y como herramienta de las nuevas políticas en la gestión del agua, dando un poder simétrico a todos los actores involucrados en dicho sector.

Conviene precisar que la verdadera transformación digital consiste en conseguir la mejor información, de manera que se puedan tomar las mejores decisiones posibles. La digitalización del sector del agua y la incorporación de la Inteligencia Artificial conduce a una mejora de la productividad (por ej. con el riego de precisión se aplica la cantidad de agua más adecuada en el momento más conveniente), a una mayor resiliencia





**En España, al igual que en otros países desarrollados, existe un alto grado de consumo energético en la agricultura, llegando a alcanzar el 4,5% sobre el total de los consumos de energía. La agricultura de regadío consume en España un 22% del total de energía del sector agrario y aproximadamente el 1% del total nacional. Aunque el peso de este consumo agrícola sobre la energía total es reducido, sus valores son considerados suficientemente importantes como para poner en marcha una serie de acciones que permitan tener un impacto significativo en los índices energéticos del sector**

(por ej. situaciones críticas de sequía agudizan el ingenio, y el tratamiento de la información adquirida nos permite anticiparnos al futuro) y a un aumento de la sostenibilidad (por ej. la adquisición de información sobre las relaciones e interacciones entre el agua, el medio natural y la actividad humana son claves en la definición de políticas exitosas). Todo ello redundará, en definitiva, en una mayor competitividad de las actividades en las que el agua, tanto en volumen como en oportunidad, es un factor clave e insustituible.

En el caso de la distribución del agua, por ejemplo, el uso de sensores y de un adecuado sistema de IoT, así como el uso de modelos hidráulicos, técnicas de inteligencia artificial, gemelos digitales y sistemas predictivos que son alimentados desde la *nube*, permiten la gestión inteligente de las redes de distribución de agua. Estas técnicas ya están siendo aplicadas en el abastecimiento y, en menor medida, en el riego, consiguiendo,

por término medio, ahorros energéticos de más del 20% con poco esfuerzo.

### Predicción de la demanda diaria de agua de riego

#### A escala de Comunidad de Regantes

González Perea *et al.* (2015) y González Perea *et al.* (2019a) desarrollaron un sistema predictivo a escala de Comunidad de Regantes (red de distribución) basado en una RNA cuya precisión y reproducibilidad es optimizada mediante el uso del algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II.

Este modelo puede ser útil para los gestores de las Comunidades de Regantes atendiendo a un gran número de objetivos. Si la comunidad de regantes tiene una tarifa eléctrica indexada al *pool* donde el precio de la energía varía cada día y se establecen perio-

dos tarifarios, el modelo desarrollado permitirá a los gerentes diseñar estrategias para distribuir el consumo de agua durante el día y así minimizar los costos de energía. Además, si la Comunidad de Regantes tiene una tarifa eléctrica superindexada donde el consumo de energía se paga por adelantado, el modelo desarrollado puede usarse para establecer un programa de riego diario que se aproxime al consumo de electricidad estimado.

#### A escala de parcela

El siguiente paso en los modelos de predicción consiste en predecir los eventos de riego (cuándo se riega) a escala de parcela. González Perea (2019b) desarrolló una metodología combinando árboles de decisión y algoritmos genéticos multiobjetivo para modelizar el comportamiento del agricultor y predecir la ocurrencia de eventos de riego.

Una vez que se conoce cuándo se producen los eventos de riego, el siguiente paso consiste en predecir la lámina de riego aplicada por cada uno de los agricultores que componen una comunidad de regantes, respondiendo así al segundo interrogante en la programación del riego (cuánto regar) (González Perea *et al.*, 2018). La lámina de riego aplicada en una zona regable y en un determinado instante es muy variable y depende en esencia del comportamiento de cada agricultor.

Este comportamiento está afectado por variables fácilmente medibles, tales como las variables climáticas, el tipo de cultivo o el tamaño de la parcela, pero también por otras de difícil medición, como las prácticas locales del riego, los días festivos o la sensación de calor. Para poder incluir todo este tipo de variables en el sistema predictivo se recurre a lo que se conoce como Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*). En 2021 se desarrolló incluso un nuevo modelo con capacidad de predecir la hora del día en el que se iba a aplicar la lámina de riego en cada una de las parcelas que componen una comunidad de regantes (González Perea *et al.*, 2021).

### Energía y riego

En España, al igual que en otros países desarrollados, existe un alto grado de consumo

energético en la agricultura, llegando a alcanzar el 4,5% sobre el total de los consumos de energía. La agricultura de regadío consume en España un 22% del total de energía del sector agrario y aproximadamente el 1% del total nacional. Aunque el peso de este consumo agrícola sobre la energía total es reducido, sus valores son considerados suficientemente importantes como para poner en marcha una serie de acciones que permitan tener un impacto significativo en los índices energéticos del sector.

El coste de la energía ha ido incrementándose en los últimos años y, por tanto, ha ido aumentando el peso de la energía en el coste total del agua. En el riego se requiere de media 0,4 kWh/m<sup>3</sup>; para la desalación 3 kWh/m<sup>3</sup>, y para la depuración de aguas residuales 0,5 kWh/m<sup>3</sup>.

La disminución del consumo energético en el riego puede alcanzarse mediante la consideración de dos aspectos: i) la disminución del consumo de agua, y ii) la adecuación de los sistemas de bombeo y de las pautas de manejo de la red de riego. El estudio de estos aspectos debe considerarse desde el punto de vista de la gestión del agua y de la gestión energética, y siempre de forma holística e integral.

Una alternativa adicional, y no menos importante, es el uso de las energías renovables. Las redes de distribución poseen en algunos puntos excesos de presión, que paradójicamente es disipada mediante mecanismos mecánicos. Esta energía puede ser recuperada a través de turbinas, micro y picoturbinas y usarla con otro fin. Pero sin duda, la alternativa principal de uso de energía renovable es la energía fotovoltaica.

En el caso del riego resulta una solución ideal, dado que generalmente las máximas necesidades hídricas de los cultivos coinciden con los periodos de máxima irradiación, además de encontrarse en un medio rural con fácil disponibilidad de espacio y de que los costes de las placas fotovoltaicas son hoy en día muy competitivos. Sin embargo, la solución no es tan fácil, pues requiere de soluciones holísticas que afronten el problema de forma integral desde el conocimiento del suelo, la planta, la red hidráulica de riego y la variabilidad climática. Todo esto es la base de un riego sostenible, inteligente y de futuro.



### El Riego Solar Inteligente (RSI) permite gestionar el riego automáticamente, mediante la sincronización en tiempo real de la producción solar fotovoltaica instantánea (como única fuente de suministro energético) con la demanda de potencia de los distintos sectores que componen la red hidráulica y las necesidades de riego de los cultivos

En el caso de cultivos leñosos, como el olivar, en el que encontramos cierta tolerancia al estrés hídrico en determinadas etapas fenológicas, el agua fácilmente aprovechable por el cultivo puede remplazar la no aplicada en un día con baja disponibilidad de irradiación, permitiéndonos así un cierto margen. Además, tener la disponibilidad de conocer en cada momento el contenido de humedad en el suelo, nos da la posibilidad de llevar a cabo un mayor aprovechamiento del recurso hídrico, ajustando así de forma precisa el riego a aplicar y consiguiendo con ello un uso más eficiente del agua.

El Riego Solar Inteligente (RSI) permite gestionar el riego automáticamente, mediante la sincronización en tiempo real de la producción solar fotovoltaica instantánea (como única fuente de suministro energético) con la demanda de potencia de los distintos sectores que componen la red hidráulica y las necesidades de riego de los cultivos (Mérida García *et al.*, 2018). Básicamente se compone de los 3 módulos siguientes:

- **Análisis hidráulico de la red.** Para ello se recurre a técnicas de modelización hidráulica,

llegando incluso a nivel de emisor, con el objetivo de determinar con precisión las necesidades de potencia en el bombeo necesarias para suministrar la presión mínima de trabajo en cada uno de los sectores de riego de la parcela.

- **Necesidades de riego y balance de agua en el suelo.** A partir de los datos diarios de evapotranspiración potencial registrados por la estación agroclimática más cercana, el modelo determina la evapotranspiración del cultivo y establece una estimación del tiempo de riego requerido para cada uno de los sectores. Todo esto se complementa, además, con un balance de agua en el suelo a escala diaria.
- **Potencia fotovoltaica disponible.** A partir de los valores de irradiación, medidos en tiempo real por un piranómetro instalado en la parcela, el modelo estima la potencia solar fotovoltaica disponible en cada momento.

Con la información generada, el sistema RSI es capaz de gestionar automáticamente el riego, aplicando las necesidades del cultivo y considerando la configuración hi-





dráulica del sistema y de acuerdo con la radiación solar disponible. Un prototipo del sistema RSI se ha instalado en la parcela de olivar experimental del Campus de Rabanales (Universidad de Córdoba), la cual cuenta con una extensión total de olivar de 13,4 ha. En los últimos tres años se está incrementando de forma notable las plantas fotovoltaicas en Comunidades de Regantes en Andalucía, existiendo ya más de 30 MW y estando en fase de ejecución y proyecto varias plantas.

En los sistemas de distribución de agua a presión, es habitual que en ciertos puntos se produzcan sobrepresiones debido a la propia topografía y a la configuración de la red. Para proteger el sistema, ese exceso de energía se disipa normalmente mediante válvulas reductoras de presión (PRV) o depósitos de rotura de carga.

La instalación de turbinas en la red de tuberías, en lugar de una PRV, para reducir el exceso de presión y al mismo tiempo generar electricidad, es una alternativa interesante. El potencial de recuperación de energía en un punto determinado de una red de distribución de agua es generalmente pequeño (entre 2 y 20 kW). Dentro de estos rangos, las turbinas tradicionales no son excesivamente competitivas, debido a sus altos costes, lo que alarga excesivamente los períodos de amortización. Este inconveniente se ha resuelto parcialmente con una tecnología innovadora llamada *Bomba como*

*Turbina* (PAT). Las aplicaciones de esta tecnología en regadío no han sido frecuentes hasta ahora. García Morillo *et al.* (2018) desarrolló una metodología para el análisis de la recuperación potencial de energía en redes de distribución del agua de riego.

### Formación e inversión

El crecimiento de las tecnologías digitales está siendo impulsado en las empresas por la necesidad de reducir costes, mejorar la eficiencia y aumentar la competitividad. En el sector agrario, el MAPA considera la digitalización como un eje transversal y estableció una estrategia de digitalización en 2019, que contempla la formación como un factor a desarrollar. Este es un aspecto que preocupa, puesto que se requieren técnicos formados en competencias digitales y que sepan dar respuesta a los nuevos retos que se presentan.

La realidad es que, pese a las múltiples ventajas que las TICs ofrecen, su adopción en la agricultura no se está realizando al mismo ritmo que en la industria. Siguiendo el modelo de innovación de Rogers nos encontramos ahora en la fase denominada "abismo". Esta fase es la que separa a los "visionarios e innovadores" de los "pragmáticos y conservadores", los cuales constituyen la masa crítica. Es de esperar que los fondos europeos *Next Generation*, en gran parte

ligados a la transición ecológica y digital, den un impulso definitivo a la adopción de las TICs en la agricultura.

El día 22 de marzo de 2022, coincidiendo con el Día Mundial del Agua, el Gobierno de España presentó el PERTE para la digitalización del ciclo del agua, en el que se prevé destinar 3.000 millones de euros. Se van a financiar programas de ayudas dirigidas al impulso de la digitalización de los diferentes usuarios del agua, con objeto de mejorar la protección del medio ambiente, la gestión de los recursos hídricos y la lucha contra el cambio climático.

A lo largo de ese año y del actual 2023 saldrán diversas convocatorias de ayudas para Comunidades de Regantes, así como para las industrias, las entidades competentes en el ciclo urbano del agua y los usuarios de aguas subterráneas. Todo esto con una inversión de 1.700 millones de euros. Otras medidas que se van a financiar por un importe de 200 millones de euros van destinadas a la implantación de elementos en tomas de agua y parcela, a la monitorización del estado de humedad y conductividad del suelo, a la medición de las aguas subterráneas y de los aportes de fertilizantes y a la automatización de los sistemas de riego.

Resulta interesante en este sentido, varias soluciones digitales propuestas, a saber: la dedicada a los sistemas de supervisión; la adquisición de datos que sirvan de base para la realización del telecontrol; la moni-



zación e implementación de herramientas tecnológicas; las aplicaciones asociadas a la mejora del riego; los sistemas soporte de decisión; la optimización energética, incluyendo la transición hacia energías renovables y ahorro energético.

Por último, cabe destacar que se prevé

destinar 225 millones de euros al impulso de la digitalización en los organismos de cuenca y de los SAIH, con especial hincapié en el seguimiento y control de vertidos en tiempo real.

La actualización de las infraestructuras hidráulicas va a tener también en los próxi-

mos años (hasta 2026) un fuerte impulso. Dentro del ya citado Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia hay una medida (C3.I1: mejora de la eficiencia y sostenibilidad) orientada al ahorro de agua y la eficiencia energética, a la que se van a destinar 563 millones de euros en el PERTE Agroalimentario (8/02/2022), dedicándose también 410 millones de euros a la modernización de regadíos sostenibles.

### Reflexiones finales

Todas las inversiones previstas facilitarán, sin duda, la capacidad de adaptación del regadío a situaciones de escasez y harán más eficiente el uso de la energía, mejorándose de ese modo el binomio agua/energía y completándose la importante modernización iniciada en 1996.

Sin embargo, aunque la era digital acaba de empezar, los momentos de cambio son momentos de oportunidad. Mediante el desarrollo de las tecnologías asociadas a internet, se abre un mundo de posibilidades para todos los sectores, incluido el agua y el regadío agrícola. ■

#### ▼ Referencias bibliográficas

- ESYRCE (2022), *Encuesta sobre superficie y rendimiento de cultivos*, Madrid, MAPA.
- GARCÍA MORILLO, J.; A. McNABOLA; E. CAMACHO; P. MONTESINOS, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2018), "Hydropower energy recovery in pressurized irrigation networks: A case of study of an Irrigation District in the South of Spain", *Agric. Water Manag.*, vol. 204, pp.17-27.
- GONZÁLEZ PEREA, R.; E. CAMACHO POYATO; P. MONTESINOS, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2015), "Irrigation Demand Forecasting Using Artificial Neuro-Genetic Networks", *Water Resour. Manag.*, vol. 29, pp. 5551-5567.
- GONZÁLEZ PEREA, R.; E. CAMACHO POYATO; P. MONTESINOS, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2018), "Prediction of applied irrigation depths at farm level using artificial intelligence techniques", *Agric. Water Manag.*, vol. 206, pp. 229-240.
- GONZÁLEZ PEREA, R.; E. CAMACHO; P. MONTESINOS, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2019a), "Optimisation of water demand forecasting by artificial intelligence with short data sets", *Biosyst. Eng.*, vol. 177, pp. 59-66.
- GONZÁLEZ PEREA, R.; E. CAMACHO, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2021), "Prediction of irrigation event occurrence at farm level using optimal decision trees", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 173-180.
- GONZÁLEZ PEREA, R.; E. CAMACHO POYATO; P. MONTESINOS, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2021), "Forecasting of applied irrigation depths at farm level for energy tariff periods using Coactive neuro-genetic fuzzy system", *Agric. Water Manag.*, vol. 256, p.107068.
- MÉRIDA GARCÍA, A.; I. FERNÁNDEZ GARCÍA; E. CAMACHO POYATO; P. MONTESINOS BARRIOS, and J.A. RODRÍGUEZ DÍAZ (2018), "Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a Smart irrigation management system", *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 670-682.