

Manejo del agua de riego en agricultura a través de una plataforma digital

Pablo Berríos, Manuel Forcén, Abdelmalek Temnani, Susana Zapata, Raúl Pérez y Alejandro Pérez-Pastor*

**Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Agronómica.
Paseo Alfonso XIII, 48. CP 30203 Cartagena, Región de Murcia.**

***alex.perez-pastor@upct.es**

En un contexto de cambio climático y alta tensión por la demanda hídrica entre los sectores, es necesario que la agricultura incorpore herramientas tecnológicas para incrementar la eficiencia del uso del agua de riego, no solo para reducir costes, sino que para asegurar la sostenibilidad económica y ambiental del sector.

Actualmente existe una amplia gama de sensores agronómicos que permiten monitorizar en tiempo real y de manera remota el estado hídrico del continuo suelo-planta-atmosfera, pero el desafío que enfrentan los agricultores es cómo interpretar estos datos para determinar el tiempo y frecuencia de riego durante la temporada, que maximicen la productividad y minimicen la lixiviación de agua y nutrientes. Es por ello que desde hace dos años se está desarrollando la plataforma Irriman, una herramienta informática basada en técnicas de *Cloud Computing* desarrollada por la Universidad Politécnica de Cartagena, que incluye registradores de bajo costo adaptables a una amplia variedad de sensores y que además de la presentación de datos de manera compacta y de fácil interpretación para los agricultores, incluye protocolos de riego validados con rigurosidad científica en las principales zonas edafoclimáticas de la Región de Murcia. La incorporación de esta herramienta ha permitido alcanzar ahorros significativos de agua de riego en gran parte de los cultivos hortofrutícolas característicos de la zona.



Incremento de la eficiencia del uso de agua de riego a nivel de parcela

Se estima que debido al cambio climático, 2.400 millones de personas viven en cuencas con escasez hídrica y las proyecciones indican que esta situación se agravará en gran parte del planeta debido a la alta sensibilidad de la escasez de agua al patrón climático [1,2]. El sector agrícola en España requiere anualmente 18.409 hm³ de agua y junto con la industria abarcan casi un 90% de la demanda [3]. Por este motivo, para reducir la presión sobre este recurso limitado, en el caso de la agricultura es esencial incrementar la eficiencia en el uso del agua de riego (EUAr), no solo para reducir costes sino para asegurar la sostenibilidad económica y ambiental del sector.

Existen varias opciones que nos permitirían incrementar EUAr a nivel de parcela, tales como:

- La selección de especies y cultivares/portainjertos resistentes o tolerantes al déficit hídrico.
- El uso de sistemas de riego de alta eficiencia diseñados en base a las características edafoclimáticas de la superficie regable y con una idónea uniformidad de descarga y distribución del agua.
- El uso de sistemas de conducción y marcos de plantación que maximicen el uso del agua por superficie.
- El control minucioso de la fenología del cultivo para aplicar estrategias de riego deficitario, como el riego deficitario controlado, desecación parcial del sistema radicular o riego deficitario sostenido.
- La incorporación de tecnologías para la toma de decisiones que permitan dar respuesta a la pregunta de ¿cuánto y cuándo regar?, basándose en valores objetivos.

Los avances de la tecnología en las últimas décadas han permitido el desarrollo de herramientas tecnológicas que permiten monitorizar el estado hídrico del suelo y la planta, en tiempo real, de forma continua, remota y, en algunos casos, a gran escala. Sin embargo, la interpretación y el manejo adecuado de datos es una labor que requiere considerar distintos factores para utilizarlos de manera correcta y simplificar la toma de decisiones. Por ello, es necesario diseñar herramientas que permitan a los agricultores acceder de manera sencilla y en un entorno útil a la información [4,5].

En condiciones de clima mediterráneo semiárido como el sudeste de España, la estimación del requerimiento hídrico del cultivo a partir del balance hídrico de FAO tiende a sobreestimar la demanda, tal como se ha observado en diversos cultivos hortícolas y leñosos [6–15]. Asimismo, este balance hídrico no permite determinar con precisión la frecuencia y tiempo de riego que minimicen la lixiviación de agua y nutrientes. En este sentido, el manejo del riego mediante el uso de sensores del tipo FDR y TDR han permitido incrementar la eficiencia del uso del agua de riego de manera significativa en diversas zonas edafoclimáticas.

La plataforma IRRIMAN

La Plataforma Irriman es una herramienta informática basada en técnicas de *Cloud Computing* desarrollada por la Universidad Politécnica de Cartagena, que incluye registradores de datos inalámbricos de bajo coste (nodos), procedentes de una amplia

gama de sensores agronómicos, y una novedosa arquitectura de software para almacenar y procesar dicha información de forma segura, facilitando el seguimiento del cultivo y la gestión del riego [4]. La plataforma no se limita a la presentación de datos de manera compacta y de fácil interpretación, sino que también, se validan los manejos de riego, con rigurosidad científica, mediante la evaluación del potencial hídrico, intercambio gaseoso y rendimiento del cultivo en parcelas representativas de las principales zonas agroclimáticas, permitiendo así, obtener protocolos de riego extrapolables. El entorno de toma de decisiones es realizado en base a la retroalimentación entre técnicos, agricultores, asociaciones y empresas participantes (Figura 1).

La plataforma está en funcionamiento ininterrumpido desde hace dos años y actualmente existen nodos desplegados en los principales cultivos hortofrutícolas de la Región de Murcia -en su mayor parte en la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena- y de Almería. La robustez de los equipos de adquisición de datos y sensores, así como el procesamiento y almacenamiento de la información, han permitido caracterizar y establecer protocolos de riego que maximizan el ahorro de agua de riego. Esto se ha llevado a cabo incorporando la información agroclimática de la red del IMIDA-SIAM [16].

La plataforma está dividida en cinco menús principales: (i) distribución geográfica de los nodos con indicador del estado hídrico del suelo en una sencilla escala de colores; (ii) variación del contenido de agua en el suelo, riego y demanda climática; (iii) salinidad; (iv) temperatura del suelo; y finalmente, (v) un visor de información geográfica GIS que permite evaluar el estado hídrico del cultivo a mayor escala y con alta resolución a partir de la medición de la reflectancia y temperatura de la canopia obtenida con sensores montados sobre un dron o satélite. La investigación realizada por nuestro grupo nos ha permitido desarrollar indicadores para las condiciones de clima mediterráneo semiárido [8,17].

En el menú relativo al riego y con el objetivo de simplificar la toma de decisiones se han incluido cinco gráficas con información complementaria en tiempo real, en los que se observa en tiempo real y en continuo el contenido de agua en el suelo, el potencial matricial del agua en el suelo o energía con la que el suelo retiene el agua, la demanda atmosférica y el riego aplicado (Figura 2).



Figura 1. Esquema simplificado del funcionamiento de la plataforma IRRIMAN.

El primer gráfico (ver Figura 2) permite monitorizar el contenido de agua en el suelo de cada sensor, en nuestro caso utilizamos sondas (conjunto de sensores) que permiten estimar el agua en el suelo cada 10 cm y hasta 60 ó 90 cm. En general, para las condiciones de riego del sudeste español la monitorización del perfil de suelo hasta 60 cm ha sido idónea para cultivos hortícola y leñosos. En algunos casos de suelos modificados para hortalizas bajo invernadero (cultivos en enarenado), la compactación y alta pedregosidad del suelo no permite instalar sensores más allá de 40 cm sin tener que disgregar la matriz del suelo, alterando en gran medida la estructura de este al menos al inicio del ciclo, eliminando raíces activas.

La variación del contenido de agua entre ciclos de riego a varias profundidades nos permite identificar la zona activa de absorción de agua y nutrientes por el cultivo, y su posible lixiviación. En base a este criterio se determina el **tiempo de riego óptimo**, que se ajustará para hacer coincidir la profundidad alcanzada por el agua de riego y el sensor considerado más activo. Los sensores instalados bajo esta zona no debieran de detectar



el agua, permaneciendo su contenido volumétrico de agua inalterado, a excepción de la ocurrencia de lluvias intensas o movimiento del nivel freático que haga variar su medida. El tiempo de riego determinado, además de minimizar la lixiviación de agua y nutrientes bajo el sistema radicular, debe asegurar una correcta lateralización del bulbo de humectación y el desplazamiento de sales. Considerando estos principios el tiempo de riego debiese ser lo más constante posible durante el ciclo de cultivo.

En el gráfico 2 (ver Figura 2), una vez seleccionados los sensores activos en la plataforma, ubicados junto al sistema radicular, se genera automáticamente el gráfico-sumatorio, que corresponde a la suma de los sensores activos determinados en el panel anterior. En este gráfico se establecen las **líneas de manejo o gestión para el riego: fin de riego (FR), capacidad de campo (CC) e inicio de riego (IR)**, este último también denominado agotamiento máximo permisible.

Para determinar la **frecuencia de riego**, es fundamental conocer la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el perfil del suelo. La capacidad de campo es la cantidad de agua retenida en el suelo después de que el exceso de agua se haya drenado y la tasa de movimiento descendente del agua haya disminuido significativamente, lo que suele ocurrir dentro de los 2 o 3 días posteriores a una lluvia o riego en suelos de estructura y textura uniforme [18]. En base a este principio, cualquier riego aplicado que suponga exceder la capacidad de campo del suelo, promoverá lixiviación de agua y nutrientes, y generará condiciones de hipoxia a las raíces. En explotaciones comerciales la capacidad de campo se podría estimar sobre el punto de estabilización del contenido de agua posterior a un riego elevado, en condiciones de baja evapotranspiración. Este valor puede ser estimado en cada sensor, sobre todo en suelos con varios horizontes, y visualizado de una manera sencilla en el perfil completo, a través del segundo gráfico.



Figura 2. Panel de plataforma IRRIMAN con información en continua y en tiempo real para la toma de decisiones del riego.

Existen dos metodologías validadas y complementarias para determinar el punto de inicio de riego mediante la variación del agua en el suelo monitorizada con sensores. La primera se basa en determinar un agotamiento máximo permisible respecto a la CC, al establecer como umbral de riego el momento en el que el contenido de agua ha disminuido un porcentaje determinado respecto a CC, es decir, aproximadamente un 10-20 ó 20-30% de CC para hortalizas y frutales leñosos, respectivamente. Este valor dependerá del sistema de riego empleado, tipo de cultivo, fenología, presencia de cubiertas vegetales, etc.

La segunda metodología consiste en relacionar el nivel de desecamiento del suelo con la demanda atmosférica. Si durante un día de verano la evapotranspiración de

referencia (ET0) fue de 6,5 mm y el contenido del suelo se redujo en 10 unidades, lo esperable es que -si se mantiene la demanda al siguiente día- el suelo se deseeque en una magnitud similar, y así sucesivamente. Cuando la variación en el contenido de agua en el suelo no tenga concordancia con la demanda climática y estado fenológico, podemos inferir que ya hay condiciones que limitan la transpiración. Estos valores pueden evaluarse objetivamente con el gráfico de stock hídrico, puesto que indica la magnitud de la variación del agua en el suelo, inclusive con una resolución horaria, lo que además permite determinar en qué hora del día es más eficiente realizar el riego.

La primera metodología tiene la ventaja de no ser necesario aplicar un desecamiento muy elevado del suelo y es ideal para cultivos de ciclo corto y hortalizas de hoja muy sensibles al déficit hídrico. En cambio, en cultivos leñosos, con un sistema radicular más extenso es posible utilizar la segunda metodología para aproximarse de manera más exacta al punto de riego idóneo.

Es importante considerar que la línea de inicio de riego determinará la **frecuencia de riego**, que será dinámica durante la temporada, es decir, a una mayor ET0 la curva alcanzará antes este punto y se requerirá una mayor frecuencia, a diferencia de días nublados o de temperaturas bajas. El contexto ideal para la programación del riego sería tener la capacidad de automatizar el inicio y fin del riego en base a las líneas de gestión establecidas, pero en muchas ocasiones el sistema de riego y la disponibilidad hídrica y energética no permiten llevarlo a cabo, por lo que se hace necesario aplicar estrategias que permitan mantener el contenido de agua en el suelo dentro de los parámetros establecidos. Asimismo, es necesario validar este criterio con medidas directas del estado hídrico de la planta como el potencial hídrico de tallo, sobre todo en períodos sensibles del cultivo o de mayor demanda.

En el gráfico 4 se encuentra toda la información relativa al riego aplicado, obtenido por contadores volumétricos de línea. Esta herramienta permite al agricultor conocer de manera precisa el agua de riego utilizada durante el período de su interés, el caudal y tiempo de riego realizado.

Finalmente, como complemento al contenido de agua del suelo, se muestra la evolución del potencial matricial del agua en el suelo. Dado que el agua en el continuo suelo-planta-atmosfera se mueve por diferencias de potencial, la tensión con la que el agua está retenida en los poros del suelo es muy útil a la hora de validar las líneas de gestión descritas anteriormente.

La implementación de la plataforma nos ha permitido alcanzar ahorros considerables del volumen de agua de riego utilizados, en gran parte de los cultivos hortofrutícolas de la Región de Murcia y Almería (Tabla 1).

Cultivo	Requerimiento hídrico* m ³ ha ⁻¹ año	Riego de precisión m ³ ha ⁻¹ año	Ahorro de agua %
Frutales cítricos			
Limonero cv. Fino 95 (fase juvenil)	978	755	22,8
Limonero cv. Fino 95 (adulto)	4939	3640	26,3
Mandarino Orogrós (joven)	5796	4869	16,0
Mandarino (adulto)	5248	3396	35,2
Mandarino Oronules (adulto)	5796	3897	32,7
Mandarino cv. Nova (adulto)	5796	4292	25,9
Naranja cv. Valencia	5363	5269	1,70
Cultivos hortícolas			
Patata	4205	2094	50,2
Pimiento	5440	4145	23,8
Lechuga invierno	1468	1132	22,9
Lechuga primavera	3873	1379	64,4
Melón (primavera)	3254	2284	29,8
Melón (primavera/verano)	4102	3327	18,8

* Estimado en base a balance hídrico de FAO [19].

Tabla 1. Volumen de agua de riego ahorrado mediante la incorporación de la plataforma IRRIMAN para la toma de decisiones del riego respecto al requerimiento hídrico estimado en base a la metodología de FAO.

Referencias

- de Nicola, E.; Aburizaiza, O.; Siddique, A.; Khwaja, H.; Carpenter, D. Climate Change and Water Scarcity: The Case of Saudi Arabia. *Ann. Glob. Heal.* 2015, 81, 342–353.
- Gosling, S.N.; Arnell, N.W. A Global Assessment of the Impact of Climate Change on Water Scarcity. *Clim. Change* 2016, 134, 371–385, doi:10.1007/s10584-013-0853-x.
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación del Gobierno de España Superficies y Producciones Anuales de Cultivos Available online: <https://www.mapa.gob.es/es/estadística/temas/estadísticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/> (accessed on 15 April 2022).
- Forcén-Muñoz, M.; Pavón-Pulido, N.; López-Riquelme, J.A.; Temnani-Rajjaf, A.; Berríos, P.; Morais, R.; Pérez-Pastor, A. Irriman Platform: Enhancing Farming Sustainability through Cloud Computing Techniques for Irrigation Management. *Sensors* 2022, 22, doi:10.3390/S22010228.
- Callejas, R.; Vera, J.; Kremer, C. Riego de Precisión En Frutales Con Sensores de Suelo; Serie Cien.; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.: Santiago de Chile, 2014; ISBN 9789561908932.
- Temnani, A.; Conesa, M.R.; Ruiz, M.; López, J.A.; Berríos, P.; Pérez-Pastor, A. Irrigation Protocols in Different Water Availability Scenarios for 'Crimson Seedless' Table Grapes under Mediterranean Semi-Arid Conditions. *Water* 2021, 13, 22, doi:10.3390/w13010022.
- Martínez-Pedreño, S.M.; Berríos, P.; Temnani, A.; Zapata, S.; Forcén, M.; Lopez, J.A.; Pavón, N.; Pérez-Pastor, A. Optimisation of Fertigation Scheduling Based on Indicators of Soil Water Status in Melon Growing in Semi-Arid Areas. *EGU21* 2021, doi:10.5194/EGUSPHERE-EGU21-15032.
- Berríos, P.; Temnani, A.; Zapata, S.; Forcén-Muñoz, M.; Franco, J.A.; Pérez-Pastor, A. Sensitivity to Water Deficit of the Second Stage of Fruit Growth in Late Mandarin Trees. *Irrig. Sci.* 2022, 1, 1–13, doi:10.1007/S00271-022-00796-W.
- Conesa, M.R.; Berríos, P.; Temnani, A.; Pérez-Pastor, A. Assessment of the Type of Deficit Irrigation Applied during Berry Development in "Crimson Seedless" Table Grapes. *Water* 2022, Vol. 14, Page 1311 2022, 14, 1311, doi:10.3390/W14081311.
- Goldhamer, D.; Fereres, E. Irrigation Scheduling Protocols Using Continuously Recorded Trunk Diameter Measurements. *Irrig. Sci.* 2001, 20, 115–125, doi:10.1007/s002710000034.
- de la Rosa, J.M.; Dodd, I.; Domingo, R.; Pérez-Pastor, A. Early Morning Fluctuations in Trunk Diameter Are Highly Sensitive to Water Stress in Nectarine Trees. *Irrig. Sci.* 2016, 34, 117–128, doi:10.1007/s00271-016-0491-y.
- Conesa, M.; De la Rosa, J.; Fernández-Trujillo, J.; Domingo, R.; Pérez-Pastor, A. Deficit Irrigation in Commercial Mandarin Trees: Water Relations, Yield and Quality Responses at Harvest and after Cold Storage. *Spanish J. Agric. Res.* 2018, 16.

13. De la Rosa, J.M.; Domingo, R.; Gómez-Montiel, J.; Pérez-Pastor, A. Implementing Deficit Irrigation Scheduling through Plant Water Stress Indicators in Early Nectarine Trees. *Agric. Water Manag.* 2015, 152, 207–216, doi:10.1016/J.AGWAT.2015.01.018.
14. Blanco, V.; Torres-Sánchez, R.; Blaya-Ros, P.J.; Pérez-Pastor, A.; Domingo, R. Vegetative and Reproductive Response of 'Prime Giant' Sweet Cherry Trees to Regulated Deficit Irrigation. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 2019, 249, 478–489, doi:10.1016/j.scienta.2019.02.016.
15. Pérez-Pastor, A.; Domingo, R.; Torrecillas, A.; Ruiz-Sánchez, M.C. Response of Apricot Trees to Deficit Irrigation Strategies. *Irrig. Sci.* 2009, 27, 231–242, doi:10.1007/S00271-008-0136-X.
16. SIAM - Sistema de Información Agrario de Murcia Descripción de La Red Agrometeorológica Available online: <http://siam.imida.es/apex/f?p=101:41:2935605704144648> (accessed on 31 August 2021).
17. Berrios, P.; Temnani, A.; Pérez, D.; Gil, I.; Zapata, S.; Forcén, M.; Ramos, T.B.; Santos, F.N.; López, J.A.; Pérez-Pastor, A. Multispectral Reflectance Vegetation Indices Are Highly Sensitive to Water Stress in Grapefruit Trees. In *Proceedings of the EGU General Assembly; EGU General Assembly, Ed.*; 2020.
18. Veihmeyer, F.J.; Hendrickson, A.H. METHODS OF MEASURING FIELD CAPACITY AND PERMANENT WILTING PERCENTAGE OF SOILS. *Soil Sci.* 1949, 68.
19. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration*. FAO 56 1998, 300.