

Sistema de apoyo a la toma de decisiones basado en el uso de las TICs para la gestión del riego de precisión en cultivos hortícolas de invernadero y leñosos al aire libre

Carmen María Flores Cayuela, Rafael González Perea, Emilio Camacho Poyato y Pilar Montesinos Barrios

Grupo de Investigación Hidráulica y Riegos. Dpto. Agronomía. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Montes. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales. Edificio Leonardo da Vinci.

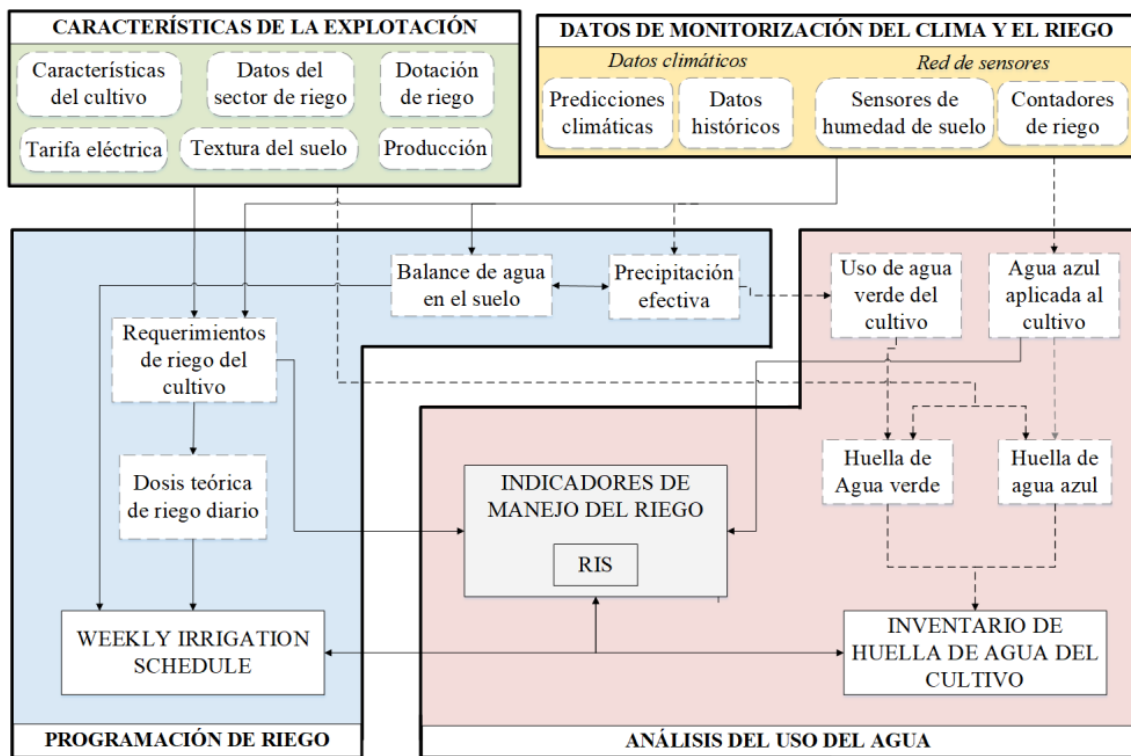
La digitalización del sector agrícola a través de la implantación de tecnologías de vanguardia permite optimizar el uso del agua, cuya escasez se ha convertido en uno de los problemas ambientales globales más relevantes y complejos.



La información recogida en el campo a través de sensores y transmitida mediante tecnologías de la información y la comunicación (TICs) es clave para determinar con precisión las necesidades de agua de los cultivos y aplicar la cantidad óptima de agua en el momento adecuado. Además, la adquisición y análisis de información de riego junto con el uso de indicadores como la huella de agua (HA) y el indicador de suministro relativo de riego (RIS, *Relative Irrigation Supply*) permiten conocer la eficiencia en el uso de agua del cultivo y realizar un diagnóstico del riego realizado en la campaña. El indicador de HA, en su fase de inventario, cuantifica el volumen de agua usada directa e indirectamente por los cultivos para producir una unidad de producto (Hoekstra,

2003). En los cultivos de regadío, este indicador puede emplearse para evaluar la eficiencia en el uso del agua ya que realmente es una relación entre la cantidad de agua usada y el rendimiento del cultivo. Sin embargo, la HA no proporciona información sobre la adecuación del riego aplicado, para dicho fin se suele utilizar el indicador de gestión del riego RIS (Levine, 1982).

En este trabajo se ha desarrollado un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la gestión del riego de precisión (DSSPIM) que utiliza los datos registrados por los sensores instalados en el campo, información sobre las características de la explotación y datos climáticos, tanto históricos como predictivos, para realizar una programación óptima de riego para 7 días. Además, DSSPIM mide la cantidad de agua que utilizan los cultivos en tiempo real con el fin de obtener un inventario de HA preciso y verificable (de acuerdo con la norma ISO, 2014) y utiliza varios indicadores de gestión del riego para evaluar la eficiencia del agua de riego. Así, DSSPIM se compone de cuatro módulos: características de la explotación, datos de monitorización del clima y del riego, programación del riego y análisis/diagnóstico del uso del agua. Cada uno de los módulos y sus interrelaciones se muestran en la Figura 1.



RIS – Relative Irrigation Supply (Suministro Relativo de Riego)

Figura 1. Esquema del modelo desarrollado.

Características de la explotación

En este módulo el usuario introduce información de la finca necesaria para la programación del riego. En el caso de los cultivos leñosos, los datos requeridos son el marco de plantación (m·m) y el diámetro medio de la copa del árbol (m). En el caso de los cultivos de invernadero, los datos requeridos son las fechas de plantación, el espaciado entre líneas de cultivo, la pendiente de la cubierta del invernadero (°), las fechas y dosis de blanqueo (kg de cal/100 L de agua). Para ambos cultivos es necesario

introducir información sobre la red de riego, que se caracteriza con el número de ramales de riego por línea de cultivo, la distancia entre emisores (m), el caudal nominal de los emisores (L/h) y la superficie del sector (ha). También es necesario conocer la asignación de agua para el riego de la campaña (dotación en m³/ha·año), conductividad eléctrica del agua de riego, la textura del suelo, fechas de inicio y fin de campaña y la cosecha obtenida (t/ha).

Datos de monitorización del clima y el riego

Los datos climáticos históricos y las previsiones meteorológicas se obtienen de los servicios meteorológicos públicos. Los datos históricos (precipitación y evapotranspiración de referencia) se toman de la red de estaciones agroclimáticas de la Junta de Andalucía mediante técnicas de “web scraping”. Por otro lado, para determinar las necesidades diarias de riego para 7 días se hacen predicciones de ET₀ a partir de las previsiones meteorológicas de AEMET OpenData y la web www.eltiempo.es. Estos datos se usan para estimar la ET₀ de los próximos 7, utilizando el modelo de radiación solar en invernadero (Fernández et al., 2010) para cultivos en invernadero y la ecuación de Penman-Monteith para cultivos al aire libre. Las predicciones de precipitación de la web [eltiempo.es](http://www.eltiempo.es) se usan solo en la programación del riego de los cultivos al aire libre.

Para cada cultivo, se colocó un dispositivo de medición de humedad en el suelo, con tres sensores capacitivos ECHO20 10HS a diferentes profundidades, para registrar las variaciones en la humedad del suelo. En el cultivo de cítricos la profundidad de instalación de los sensores fueron 15, 40 y 55 cm y para el cultivo de tomate 10, 17 y 25 cm. A la entrada de cada sector de riego también se instalaron contadores de riego para registrar la cantidad de agua utilizada. Estos dispositivos estaban conectados a un datalogger con comunicación GPRS que registra y transmite los datos a una plataforma en la nube, accesible a través de una API (*Application Programming Interface*).

Programación de riego

Para la programación de riego, el modelo usa como base la metodología de la Organización de las Naciones Unidas para Agricultura y la Alimentación (FAO) (Allen et al., 2006). Utilizando la información climática, los datos de los sensores de humedad de suelo y contadores de riego, el modelo realiza un balance de agua en el suelo para 7 días que sirve para determinar el momento de riego. Cuando el contenido de agua en el suelo es inferior al nivel de agotamiento permisible, es necesario regar. Este balance de agua en el suelo se recalcula diariamente en función de los datos actualizados de las sondas de humedad de suelo y las predicciones climáticas. Siguiendo la metodología de la FAO y usando las predicciones de ET₀ calculadas por el módulo anterior, se calculan los requerimientos de agua del cultivo. Finalmente, en función de la estrategia de riego seleccionada (configurable en regar a cubrir 100% de las necesidades, riego deficitario sostenido y riego deficitario controlado), la conductividad eléctrica del agua de riego, las características de la red de riego y en el caso de invernaderos, también su pendiente y enclavado, se determina la dosis y tiempo de riego diario.

Análisis de uso del agua

Para analizar el uso de agua se usan los indicadores de HA y RIS. La huella de agua de un cultivo (HAc) es la suma de la huella de agua azul (agua de riego) (HA_{azul}) y huella de

agua verde (agua de lluvia) (HA_{verde}). La HA_{azul} se calcula como el volumen total de agua de riego aplicado al cultivo (m^3/ha) durante la campaña de riego dividido entre la producción obtenida. El primero de los datos se obtiene de las medidas tomadas por los contadores instalados en campo entre las fechas de inicio y fin de campaña. La HA_{verde} es el volumen de agua de lluvia aprovechado por el cultivo dividido entre la producción. El volumen de lluvia que aprovecha el cultivo es el valor de la precipitación efectiva (agua de lluvia disponible para las raíces), acumulada entre las fechas de inicio y fin de campaña.

Para determinar el nivel de adecuación del riego aplicado, se utiliza el indicador RIS (suministro relativo de riego), que se obtiene como cociente entre valor de agua aplicada al cultivo durante la campaña (dato que ha sido previamente recopilado para realizar el inventario de HA_{azul}) y las necesidades teóricas de riego del cultivo en esa misma campaña.

Resultados obtenidos

El sistema se aplicó en dos explotaciones ecológicas del sur de España, una con cultivos de naranjos y otra con cultivos de tomates en invernadero, cuyas características recoge la tabla 1.

Naranja		Tomate de Invernadero	
5.000 m ³ /ha	<i>Dotación</i>	Sin restricción	
2,8 l/h	<i>Caudal gotero</i>	4 l/h	
2	<i>Nº ramales/línea</i>	1	
1 m	<i>Separación emisores</i>	0,4 m	
Franco Arenosa	<i>Textura suelo</i>	Franca	
16,5 t/ha	<i>Producción</i>	109,5 t/ha	
2 ha	<i>Sup. sector riego</i>	0,7 ha	
25-01-2019 /// 30-01-2020	<i>Inicio /// Fin campaña</i>	20-8-2019 /// 22-05-2020	
<i>Marco plantación</i> 4 x 5,5 m		2,05 m	<i>Separación entre ramales</i>
<i>Diámetro copa</i> 3,5 m		2 dS/m	<i>CE agua de riego</i>
		20 ‰	<i>Pte. Cubierta invernadero</i>
		25 kg/100 l (20-08 a 17-09-2019)	<i>Dosis y fecha encalado</i>

Tabla 1. Características de las fincas de ensayo en la campaña 2019/2020.

El modelo desarrollado permitió obtener programaciones de riego óptimas gracias al uso de información proporcionada por los dispositivos instalados en campo y las predicciones meteorológicas. La comparación entre escenarios de diferentes sistemas de gestión del riego en naranjos muestra que la aplicación de estrategias de riego deficitario controlado permite reducir el uso de agua de riego en un 20%. Además, el modelo permitió ajustar el uso de agua durante la campaña a la asignación disponible y, los resultados muestran que, ante un mismo consumo de agua de riego, las diferencias en el manejo del riego (frecuencia y duración) dan lugar a un menor aprovechamiento del agua de lluvia almacenada en el suelo (Figura 2).

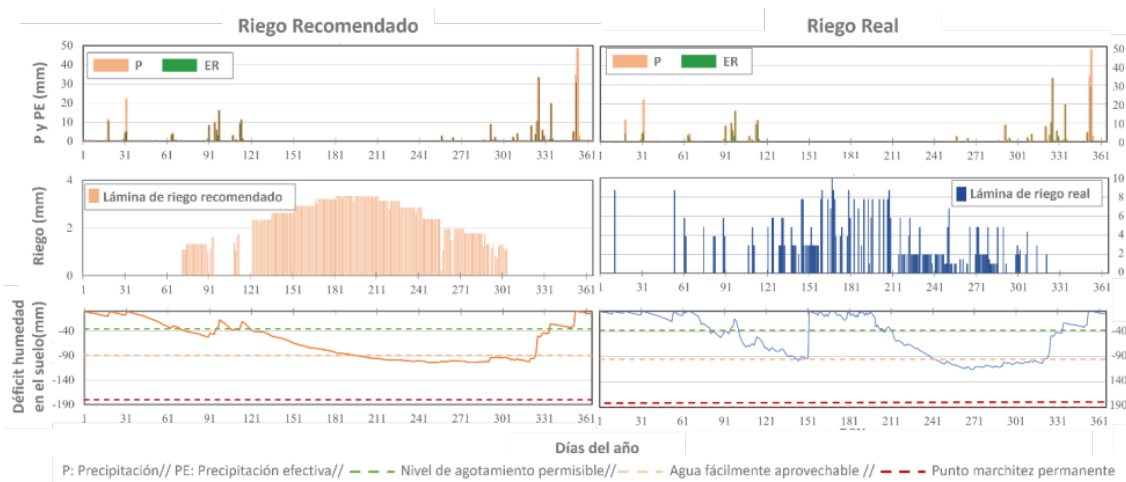


Figura 2. Comparación de escenarios de manejo en naranjo. Recomendado vs Real.

En el cultivo del tomate, el manejo recomendado por DSSPIM y el manejo real del regante se ajustaron estrechamente a las necesidades del cultivo, con la excepción del final del ciclo, cuando el agricultor tomó decisiones relacionadas con aspectos que el modelo no considera, como el decaimiento de la producción al final del ciclo del cultivo.

Los contadores de riego instalados en las fincas registraron un consumo de 4.966 m³/ha en los naranjos y 5.576 m³/ha en el tomate, por lo que los análisis de HA indicaron que fueron necesarios 445 m³ de agua para obtener una tonelada de naranja (de los cuales 144 m³/t proceden del agua de lluvia), y 51 m³/t en el caso del tomate de invernadero. El indicador RIS, con valores de 0,70 y 0,85 para naranjo y tomate respectivamente, mostró que el agua aplicada a los cultivos fue inferior a los requerimientos del cultivo durante la campaña a causa de la baja dotación de agua para riego, en el caso de los naranjos y en el caso de los tomates, por cuestiones de manejo del cultivo.

Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un modelo de apoyo a la toma de decisiones sobre la gestión del riego de precisión, DSSPIM, que realiza y evalúa la gestión óptima del riego en cultivos al aire libre y en cultivos hortícolas de invernadero. Mediante el uso de las TICs, DSSPIM realiza una programación óptima del riego semanal adaptada a las características de cada finca, usando datos reales tomados in situ mediante sensores y a partir de previsiones meteorológicas de datos abiertos. La utilización de indicadores que evalúan el uso de agua en la campaña facilita detectar ineficiencias en la gestión del riego y desviaciones en la programación de riego real en comparación con la programación DSSPIM recomendada, lo que permite tomar acciones de mejora dirigidas a aumentar la eficiencia en el uso del agua.

Referencias

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos*. Fao 297.

Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E., 2010. *Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate*. *Irrig. Sci.* 28, 497–509. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0210-z>

Hoekstra, A.Y., 2003. *Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series No. 12*. IHE Delft, The Netherlands.

ISO, 14046, 2014. Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Levine, G., 1982. Relative Water Supply: an Explanatory Variable for Irrigation Systems, Technical Report.