

Gemelo digital en viñedo

para programación automática del riego

Con una menor cantidad de agua se consigue una igual o mayor producción de uva



Sandra Millán¹, Luis Alberto Mancha¹, David Uriarte¹, Carlos Campillo¹, Jaime Casadesus² y Cristina Montesinos¹.

¹ Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (Cicytex), Finca La Orden, Junta de Extremadura, Autovía A-V, Guadajira, Badajoz.

² Programa de Uso Eficiente del Agua en la Agricultura, Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias (IRTA), Parc de Gardeny (PCITAl), Fruitcentre, Lleida.

El objetivo de este trabajo es validar en condiciones de campo un sistema totalmente automatizado de riego por goteo, basado en los gemelos digitales, en una parcela de viñedo ubicada en las Vegas Bajas del Guadiana. Se contempla la adopción de una programación de riego que persiga una alta productividad del agua de riego con el empleo de estrategias de RDI, que tenga un límite máximo de riego de 2.700 m³/ha, dosis que se ha establecido como máxima dotación en los nuevos regadíos de Tierra de Barros, provincia de Badajoz.

Se prevé que la población mundial aumente hasta los 9.800 millones de habitantes en 2050, lo que supondrá un incremento en la demanda de agua y alimentos. Sin embargo, las previsiones de los modelos climáticos sugieren aumentos significativos de la temperatura y una disminución de la precipitación anual, lo que implicará un incremento de la demanda evaporativa y con ello, una disminución de los recursos hídricos disponibles durante el siglo XXI. Según la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas, la agricultura es responsable de más del 70% del consumo mundial de agua y se estima que las cantidades utilizadas para el riego aumentarán en un 14% en los próximos diez años (Singh *et al.*, 2014). Para hacer frente a la escasez de agua y mejorar la rentabilidad de los cultivos es necesario maximizar la productividad del agua mejorando la eficiencia en el uso de este recurso limitado. En la agricultura de regadío, las estrategias de riego deficitario controlado (RDI) consisten en imponer déficits de agua en las etapas fenológicas menos sensibles al estrés hídrico con el fin de restringir el crecimiento vegetativo afectando mínimamente al rendimiento y la calidad de los frutos (Girona *et al.*, 1993). En viña, la adopción de estas estrategias ha demostrado ser efectiva para mejorar la composición de las uvas para vinificación (Williams and Matthews, 1990), además de unos ahorros importantes de agua.

Sin embargo, la aplicación exitosa de estas estrategias de gestión del riego puede resultar complicada porque se requieren ciertos conocimientos técnicos y en determinadas ocasiones la disponibilidad de agua en la parcela está limitada por las comunidades de regantes. Para solventar estos problemas aparece la tecnología de gemelos digitales.

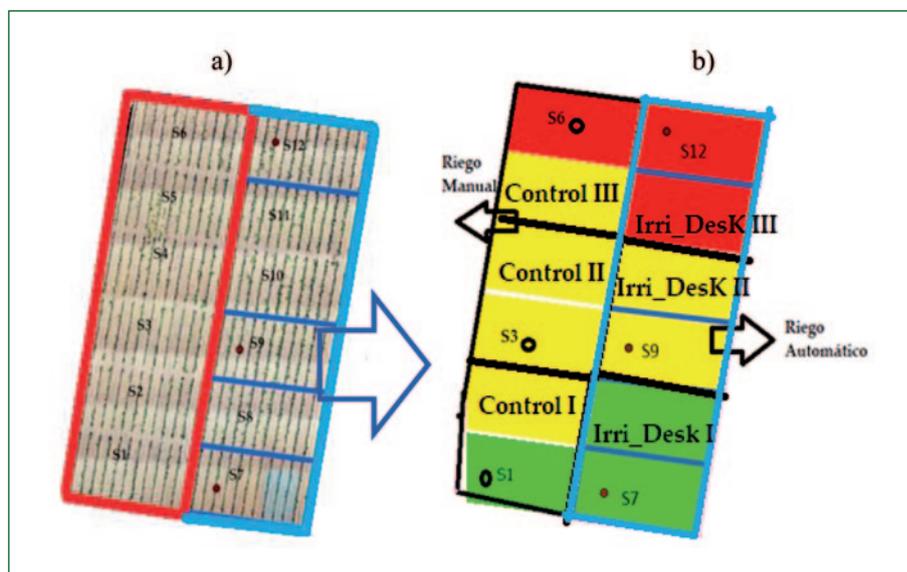
Un gemelo digital (o *digital twin*) es una representación digital de un objeto, proceso o servicio físico. Estas réplicas virtuales son utilizadas para hacer simulaciones antes de que se creen e implementen cambios en los objetos reales, con el fin de recopilar datos para predecir cómo funcionarán. De manera que, mediante la utilización de un gemelo digital, las decisiones se toman en base a la monitorización continua y adquisición de datos (datos climáticos, humedad de suelo, fertilización, consumos de agua, fertilizantes y energía, imágenes, etc.). Además, se realiza el procesamiento de los datos (modelización, simulación y predicción) y representación de la información. La aplicación de este concepto al riego es posible gracias a la captura automática de una gran cantidad de información de la parcela de cultivo, el análisis masivo de los datos, de forma que ciertas tareas tediosas y complejas se conviertan en simples y accesibles en tiempo y forma, disminuyendo la mano de obra y aumentando la cualificación del trabajo.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el año 2021 en una parcela situada en la Finca Experimental La Orden (Badajoz) (latitud 38°51'19.06"N, longitud 6°40'18.90"W, datum WGS84), perteneciente al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (Cicytex) de la Junta de Extremadura. La parcela presenta una superficie de 9.072 m² de viñedo (*Vitis vinifera*, L.) de la variedad



FIG. 1 Parcela de estudio. Área azul, riego gestionado por Irri_DesK (riego automático), área roja, riego gestionado manualmente (Control). S1, S2, S3, S4, S5 y S6 sectores de riego Control y S7, S8, S9, S10, S11 y S12 sectores de riego Irri_DesK (a) y parcela de ensayo con las diferentes sectores de riego en los cuáles se seleccionan los puntos de seguimiento S1, S3, S6, S7, S9 y S12 (b). Colores diferentes indican rangos de CEa diferentes.



Garnacha Blanca, plantada en febrero 2018 con un marco de plantación 3 x 1,4 m, en orientación norte-sur. La parcela está formada por doce parcelas elementales (sectores de riego) de 756 m², distribuidas en doce filas con quince cepas cada una y provistas de electroválvulas para su manejo diferencial. La parcela, se dividió en dos áreas: (1)

área roja (control) donde el riego se gestionaba de manera manual (sectores 1-6) y (2) área azul (Irri_DesK) donde el riego se gestionaba de manera automática (sectores 7-12) (**figura 1a**). Cada área controla un total de 1.080 cepas usando unos emisores con una tasa de descarga de 4 l/h, espaciados 0,70 m. En el tratamiento Control, la gestión del riego se

realizó en base a los criterios técnicos del área de agronomía de cultivos leñosos y hortícolas en el área de viticultura, con la dotación máxima de 2.700 m³/ha previstas para los nuevos regadíos de Tierra de Barros.

Se planteó una estrategia de riego deficitario para maximizar la producción de uva con la dotación establecida. Esta estrategia pretendía aplicar riego para limitar el estrés hídrico en las cepas de leve a moderado durante pre-envero, mientras que en el periodo de maduración (post-envero), se buscó un mayor estrés hídrico reduciendo el agua aplicada, lo que supuso el 41% del riego aplicado en pre-envero. Los cálculos de riego se realizaron en función de la ecuación $ET_C = ET_O \times K_C$ donde ET_O fue calculada según la fórmula de Penman y Monteith (Allen *et al.*, 1998), empleando los datos de una estación agrometeorológica próxima, perteneciente a la red de asesoramiento al regante de la Junta de Extremadura (Redarex, <http://redarexplus.gobex.es>) y K_C adaptado al desarrollo vegetativo del viñedo (Picón *et al.*, 2012). En el tratamiento Irri_DesK, el riego se gestionaba de manera automática a través de la aplicación Irri_DesK (Casadesus *et al.*, 2012), con un plan estacional que imitaba el criterio del técnico en el tratamiento Control.

Caracterización espacial previa de la parcela

Previamente al establecimiento de los tratamientos, se llevó a cabo una caracterización de la variabilidad espacial de la parcela en función de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) a dos rangos de profundidad (0-0,50 m y 0-1,50 m) usando un sensor Dualem-1S equipado con un GPS, localizado a ras del suelo. Se obtuvo un mapa de CEa mediante Krigeado ordinario usando el programa geo estadístico QGIS 2.18, que permitió identificar zonas homogéneas en las que se establecieron ambos tratamientos y se



definieron las diferentes subzonas de seguimiento en cada tratamiento. Para la diferenciación de las subzonas se establecieron tres categorías en función de los valores de CEa, según el histograma de frecuencias en QGIS 2.18: (I) Verde, zona de suelo más ligera, con valores de CEa más bajos y con mayor contenido en arena y menor capacidad de retención de agua; (II) Amarillo, con valores de CEa intermedios, textura y capacidad de retención de agua de suelo intermedia; y (III) Rojo, zona con valores más altos de CEa, con una textura de suelo más arcillosa y mayor capacidad de retención de agua. En cada subzona se seleccionaron tres puntos de seguimiento para cada tratamiento (**figura 1b**).

Así, en los sectores de riego manejados por Irri_DesK (S7, S8, S9, S10, S11 y S12) se establecieron tres zonas con programación de riego independiente, de forma que cada subzona disponía de un punto de referencia de información: Irri_DesK I (S7 y S8) que coincidía con la zona verde, Irri_DesK II (S9 y S10) con la zona amarilla, e Irri_DesK III (S11 y S12), zona roja. El objetivo fue evaluar las diferencias de programación efectuadas por el modelo, en función de las características de suelo y su influencia sobre el contenido de agua en el suelo. De esta ma-

nera, el modelo permitió regar dentro del mismo tratamiento de manera diferencial cada subzona (variabilidad espacial de las características texturales) en base a los datos recogidos en cada punto de referencia.

Medidas en parcelas

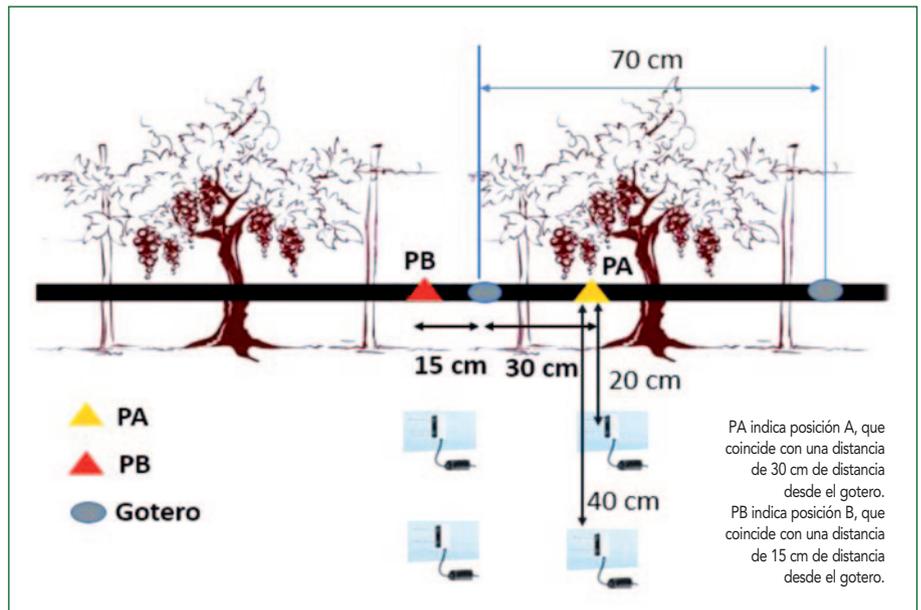
En cada punto de seguimiento manejado por Irri_DesK se monitorizó el contenido de agua en el suelo en un gotero de referencia con una batería de cuatro sondas de capacitancia Teros 10 (Decagon Devices, Inc., Pullman, EE.UU). Para caracterizar el bulbo húmedo en el entorno de influencia del gotero, se colocaron dos juegos de sensores a 20 y 40 cm de profundidad y a 15 cm y 30 cm de separación en dos posiciones relativas respecto al gotero (**figura 2**). Los volúmenes de riego se registraron diariamente mediante medidores digitales de agua (MTKD-M, Zenner, Villaviciosa de Odón, Madrid) instalados en cada sector de riego.

Plataforma web de riego automático: Irri_DesK

La programación de riego automática, se hizo con la plataforma web Irri_DesK. Todos los días tiene lugar un ciclo cerrado que es el que se describe a continuación (**figura 3**). En una parcela con unas ca-

racterísticas determinadas de suelo, sistema de riego, cultivo, etc. Después de aplicar un riego, se produce un movimiento del agua en el sistema suelo-planta, de forma que parte se redistribuye en el suelo y otra parte es utilizada por el cultivo. La sensorización de la parcela permite tener una gran cantidad de información sobre la dinámica del agua dentro del sistema suelo-planta, y parte de esta información será relevante para tomar decisiones de riego. A esta información, se le añade información adicional sobre las condiciones meteorológicas y datos históricos de la parcela o aportados por el agricultor o técnico y que converge en un modelo de simulación (gemelo digital). Con estas fuentes de datos depuradas y procesadas, el gemelo digital dispone de un algoritmo para llevar a cabo las decisiones de riego. Este algoritmo ha sido

FIG. 2 Esquema de instalación de sensores de humedad.



desarrollado por Casadesús *et al.*, 2012 y probado en varios cultivos (Millán *et al.*, 2020; Domínguez-Niño *et al.*, 2020).

Finalmente, se cierra el ciclo enviando Irri_DesK las órdenes al programador de riego y aplicando el riego en la parcela.

FIG. 3 Esquema de la plataforma web Irri_DesK.

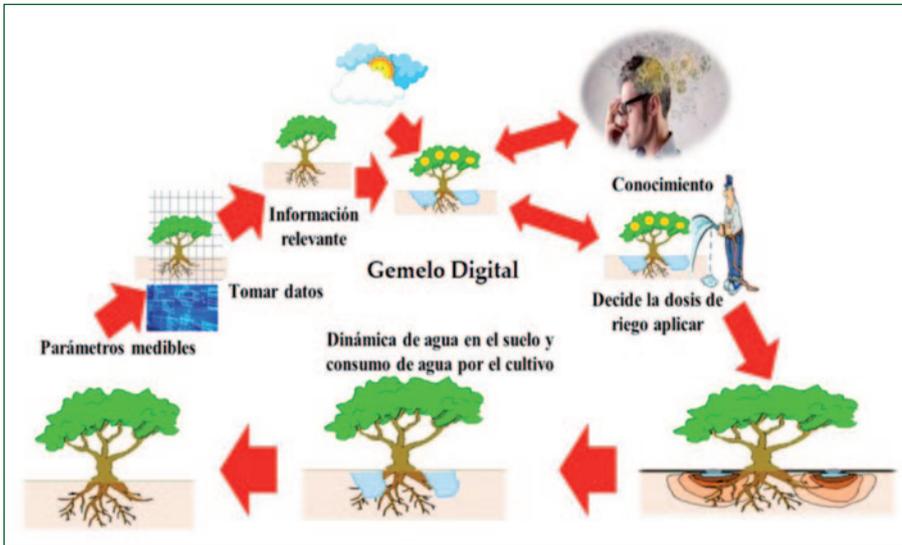
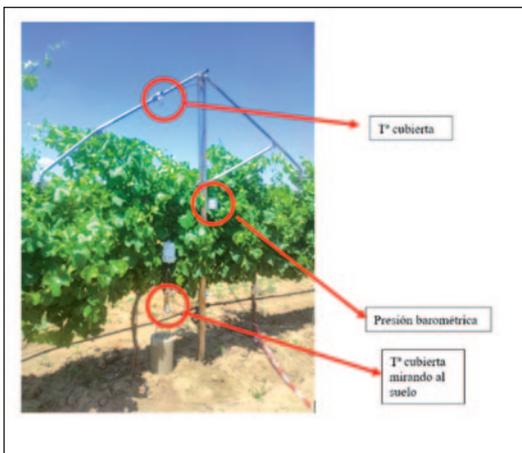
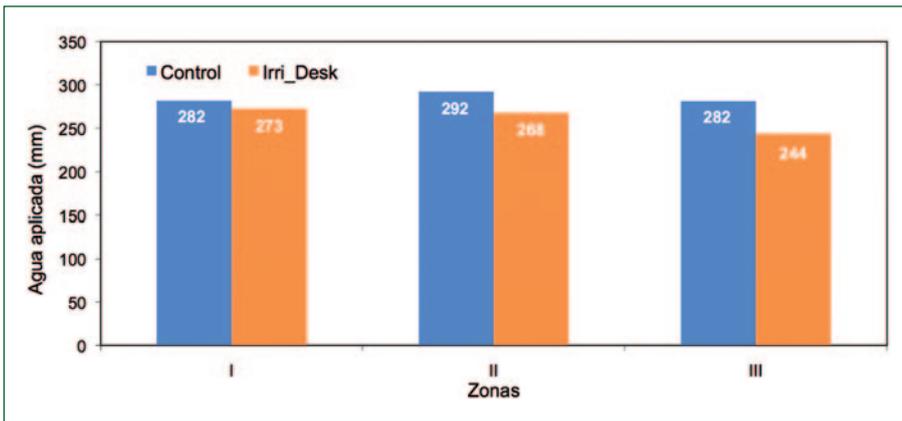


FIG. 4 Agua aplicada en el año 2020 en cada zona de riego del tratamiento Control y tratamiento Irri_DesK.



Desarrollo del cultivo, ajuste de K_c y producción

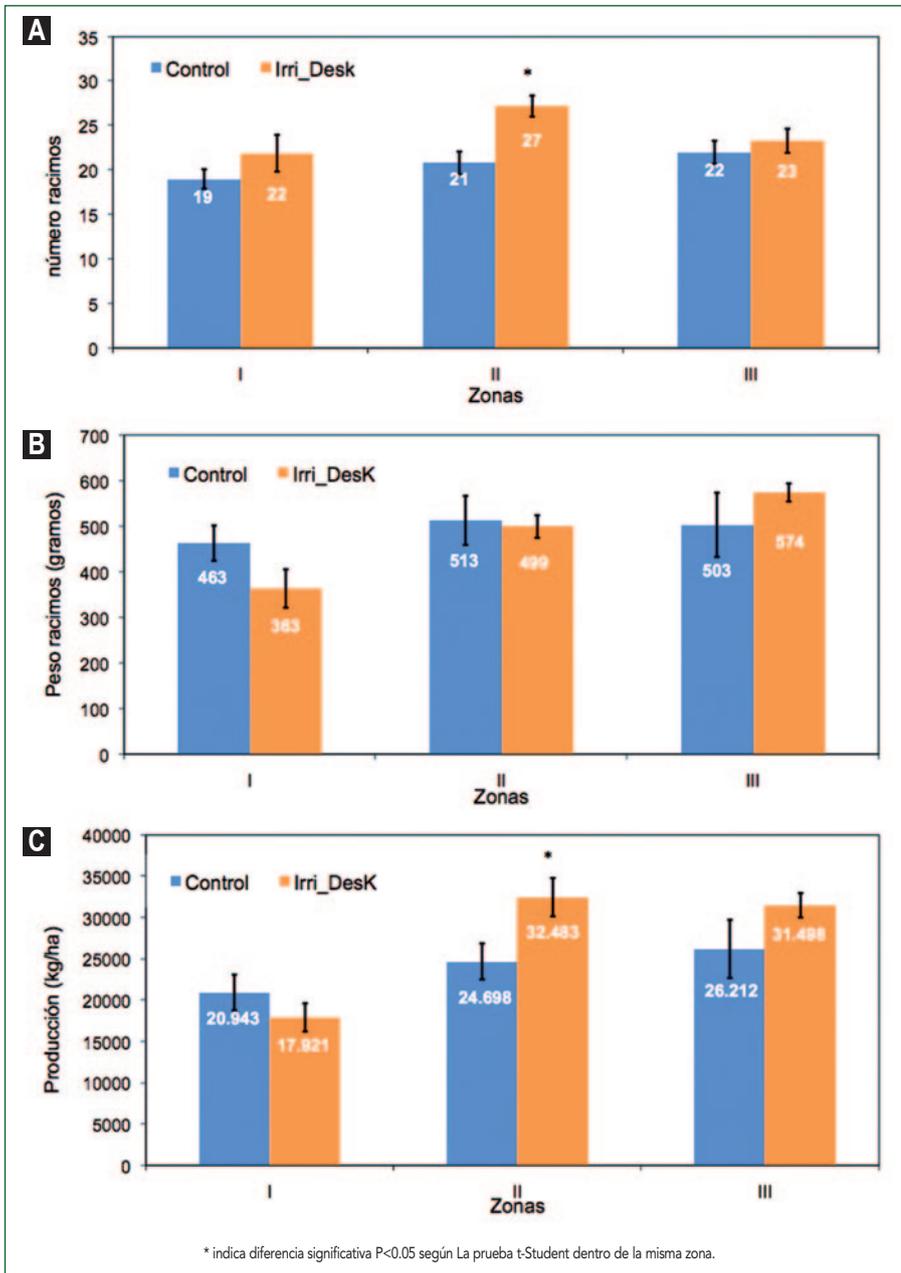
El ajuste de K_c se realizó en función del desarrollo del cultivo, el cual se estimó quincenalmente midiendo la fracción de radiación interceptada por las cepas con un ceptómetro (Accupar LP-80 de Decagon Devices) en dos cepas por subzona. La vendimia se realizó en cada una de las subzonas, cuando se alcanzó una concentración de sólidos solubles próxima a 23 °Brix. Se

pesaron y contaron todos los racimos de diez cepas seleccionadas en cada zona para determinar la producción.

Resultados

La cantidad de agua aplicada por Irri_DesK fue menor que el Control en todas las zonas de ensayo, e igual o inferior a los 270 mm (figura 4) lo que indica que el sistema respondió de forma satisfactoria a la limitación automática de máxima dotación de agua permitida establecida al inicio de la campaña de riego. Sin embargo, en el caso del riego Control existe un pequeño desfase en la aplicación de agua debido al porcentaje de eficiencia del sistema, aunque en ningún caso superó en más de un 10% de la máxima dotación permitida. En la zona III, Irri_DesK aplicó menos agua que en el resto de zonas manejadas por el sistema de riego automático, coincidiendo con la zona de mayor contenido en arcilla. Se observó una tendencia hacia un mayor número de racimos en el tratamiento Irri_DesK respecto al Control, que fue significativa en Irri_DesK II, con 27 racimos frente a los 21 del Control II (figura 5a). El peso medio de los racimos no mostró diferencias significativas en función del sistema de gestión del riego (figura 5b). La zona I, zona con un mayor contenido en arena, fue la menos productiva del ensayo con producciones entorno a los 21.000 kg/ha y 18.000 kg/ha en Control I e Irri_DesK I respectivamente, mientras que las zonas II y III alcanzaron producciones superiores a los 30.000 kg/ha en los tratamientos Irri_DesK II y III y algo inferiores en Control II y III con suelos intermedios (II) y arcillosos (III). En cuanto al efecto del sistema de gestión de riego utilizado, la producción fue significativamente mayor sólo en Irri_DesK II, posiblemente debido al mayor número de racimos por cepa en suelo con características intermedias (arenoso y arcilloso).

FIG. 5 Medida del número de racimos (a), peso de los racimos (b) y producción  de los diferentes tratamientos de riego en las diferentes subzonas (c).



El sistema Irri_DesK aplicó mayor cantidad de agua a la zona I mientras que el mayor ahorro de agua de riego aplicada correspondió a las zonas II y III de Irri_DesK, coincidiendo con el menor desarrollo de la vegetación (datos no mostrados), lo que demuestra que el reajuste provocado por la información captada en la parcela fue eficaz.

Conclusiones

En este estudio se probó un sistema de riego automático mediante una plataforma web Irri_DesK, comparando con la gestión de riego realizada de manera manual, en un viñedo de Garnacha Blanca adoptando una estrategia de riego deficitario en post-enero.

Las principales conclusiones de este estudio son:

- El sistema automático utilizó un volumen de agua ligeramente inferior al control (entorno a un 9% menos de media), adaptándose en cada zona a la información proporcionada por los sensores.
- Las producciones fueron similares o superiores en las zonas Irri_DesK.
- El sistema automatizado demostró estar capacitado para regar sin intervención humana al nivel de un usuario experto.
- El sistema automático permitió realizar un mejor ajuste a las dotaciones máximas establecidas en la zona regable de Tierra de Barros donde la máxima dotación para el riego se establece en 2.700 m³/ha. ■

AGRADECIMIENTOS

 Proyecto AGROS 2022, subvencionado por la Junta de Extremadura y cofinanciado con fondos FEDER.

BIBLIOGRAFÍA

Casadesús, J., Mata, M., Marsal, J., and Girona, J. (2012). A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, 11-20.

Domínguez-Niño, J. M., Oliver-Manera, J., Girona, J., and Casadesús, J. (2020). Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. *Agricultural Water Management*, 228, 105880.

Girona, J.; Mata, M.; Goldhamer, D.; Johnson, R.; DeJong, T. Patterns of Soil and Tree Water Status and Leaf Functioning during Regulated Deficit Irrigation Scheduling in Peach. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 1993, 118, 580-586.

Millán, S., Campillo, C., Casadesús, J., Pérez-Rodríguez, J. M., and Prieto, M. H. (2020). Automatic Irrigation Scheduling on a Hedgerow Olive Orchard Using an Algorithm of Water Balance Readjusted with Soil Moisture Sensors. *Sensors*, 20(9), 2526.

Picón-Toro, J., González-Dugo, V., Uriarte, D., Mancha, L. A., and Testi, L. (2012). Effects of canopy size and water stress over the crop coefficient of a "Tempranillo" vineyard in south-western Spain. *Irrigation Science*, 30(5), 419-432.

Singh, A. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. *J. Hydrol.* 2014, 519, 1688-1697

Williams, L.E. and Matthews, M.A (1990) Grapevine. In: *Irrigation of agricultural crops* (Agronomy Monograph No. 30). Eds. B.A. Steward and D.R. Nielsen (ASA-CSSA-SSSA: Madison, WI) pp. 1019-1055.