

Riego automático en tomate de industria como apoyo a una producción más sostenible

Implementación de un sistema de precisión para adoptar estrategias de riego deficitario

En los últimos años se ha visto cómo el nivel de los embalses extremeños ha ido disminuyendo debido a la intensificación de la agricultura. En el año 2023, la situación actual de los embalses de la provincia de Badajoz es preocupante, ya que, pese a las lluvias de estos días no se han conseguido revertir la tendencia a la baja de los volúmenes de agua embalsados. La persistente sequía ha provocado que en dos años consecutivos se limite la superficie regada en Extremadura, afectando al tomate de industria, uno de los principales cultivos de las Vegas del Guadiana, pasando de 23.000 hectáreas en 2021 a 17.000 en 2022.

La dotación de agua para el cultivo del tomate en Extremadura en campañas normales está entorno a los 6000 m³/ha. Cuando las restricciones de riego se aplican a la dotación de las parcelas los agricultores suelen optar por reducir la superficie de cultivo proporcionalmente a la reducción de la dotación. Estas situaciones de escasez de recursos hídricos no han sido habituales en estos regadíos ya que Extremadura es la región con mayor capacidad de almacenamiento de agua por lo que los regadíos suelen estar bien dotados. Sin embargo, las sequías amenazan con ser cada vez más frecuentes originando un aumento de la competencia por el agua, por lo que se hace fundamental

Sandra Millán¹, Cristina Montesinos¹, Eugenio Marquez¹, María Borrego¹, Marta Rosario¹, Jaime Casadesus² y Carlos Campillo¹.

¹ Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Finca La Orden, Junta de Extremadura, 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 la herramienta Irri_Desk para llevar a cabo un sistema de riego automatizado de riego por goteo, en una parcela de tomate de industria ubicada en las Vegas Bajas del Guadiana. Además, se evaluó cómo Irri_Desk consigue producciones rentables con un límite de consumo de agua inferior a 5.000 m³/ha.



crear la conciencia de que es necesario usar el agua de forma eficiente. Para ello se dispone de condiciones adecuadas con más de un 60% de la superficie de cultivo con sistemas de riego localizado.

En la agricultura de regadío, las estrategias de riego deficitario controlado (RDC) consisten en imponer déficits de agua en las etapas fenológicas menos sensibles al estrés hídrico con el fin de reducir el crecimiento vegetativo afectando mínimamente al rendimiento y la calidad de los frutos (Girona *et al.*, 1993). En tomate de industria, la adopción de estas estrategias ha demostrado ser efectiva para aumentar los sólidos solubles totales en fruto (Johnstone *et al.*, 2005), además de suponer unos ahorros importantes de agua.

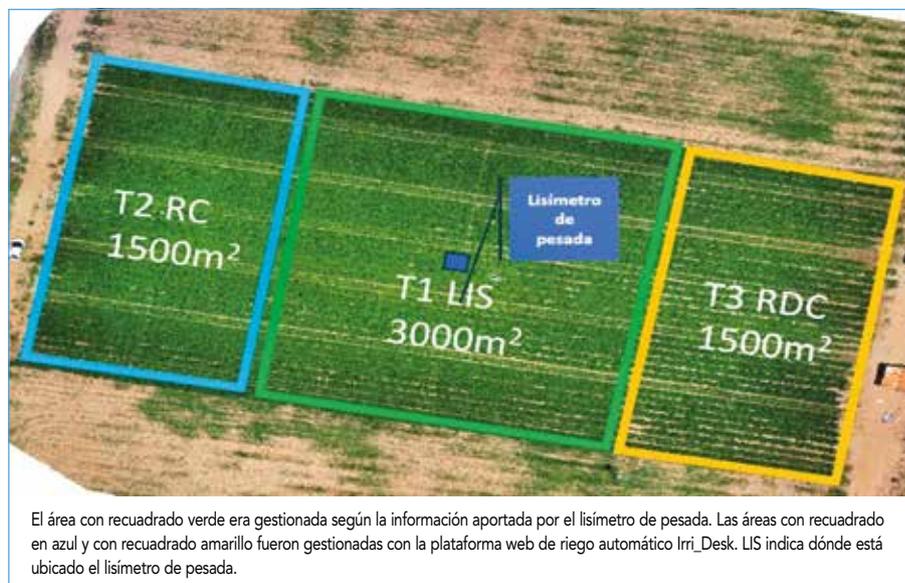
Irri_Desk es una herramienta que permite realizar un riego de precisión que integra diferentes tecnologías: sensores, teledetección y simulaciones (Casadesús *et al.*, 2012). Realiza un bucle diario cerrado para el control del riego aportando cuatro tipos de información relevante para la programación de riego: riego aplicado, estado hídrico del suelo, vigor del cultivo y estado hídrico del cultivo. En los últimos años, a través de diferentes proyectos Irri_Desk ha sido probado en diversos cultivos, como el ciruelo (Millán *et al.*, 2019), manzano (Jesús M. Domínguez-Niño *et al.*, 2019) y olivar en seto (Millán *et al.*, 2020), mejorando la productividad del agua en un 15% respecto de una gestión humana experta y reduciendo en un 80% el tiempo necesario de supervisión y control de riego.

Materiales y métodos

Descripción de la parcela

El estudio se llevó a cabo en el año 2023, dentro del proyecto Digispac y ET4Drought en una parcela situada en la finca experimental La Orden en Badajoz (latitud 38° 51' 19.06" N, longitud 6° 40' 18.90" W, datum WGS84), perteneciente al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológi-

FIG. 1 Parcela de estudio con los diferentes tratamientos.



cas de Extremadura (Cicytex) de la Junta de Extremadura. La parcela presenta una superficie de 6.000 m² de tomate de industria (*Lycopersicum esculentum* Mill) variedad H1015, trasplantada el 15 de abril de 2023 con un marco de plantación de 1,5 m x 0,24 m y una densidad de plantación de 27.777 plantas/ha.

La parcela está formada por tres parcelas elementales (sectores de riego), en la cuál se realizaban tres tratamientos de riego diferentes: T1 (3.000 m²), T2 (1.500 m²) y T3 (1.500 m²) (figura 1). En el tratamiento T1, el riego se programó para cubrir las necesidades hídricas del cultivo a lo largo de todo su ciclo, en base a la ETc del día anterior, obtenido de un lisímetro de pesada (2,67 m x 2,25 m x 1,5 m) en el que se reproducían las condiciones de cultivo como en el resto del ensayo. El tratamiento T2, se llevó a cabo de manera automática con la plataforma web Irri_Desk en el cual se realizaba un riego deficitario en la fase de maduración. El tratamiento T3 se realizó también con Irri_Desk pero induciendo un estrés en la fase inicial y posteriormente en la etapa de maduración del cultivo coincidiendo con lo realizado en el tratamiento

T2. Los tomates se regaban diariamente utilizando un sistema de riego por goteo usando unos emisores con una tasa de descarga de 1 l/h, espaciados 0,30 m.

Variabilidad espacial y selección de los puntos de control

Antes de realizarse el trasplante del cultivo, se utilizó el sensor Dualem-1S para llevar a cabo una caracterización de la variabilidad espacial de la parcela en función de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) a una profundidad de 0-0,50 m. Se obtuvo un mapa de CEa mediante Krigeado ordinario usando el programa geoestadístico QGIS 2.18, que permitió identificar zonas homogéneas en las que se establecieron los diferentes tratamientos. En el mapa se diferenciaban tres zonas diferentes: (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 los tratamientos T2 y T3 se seleccionaron tres puntos de control para ajustar la programación hídrica y en el tratamiento T1 se seleccionaron seis puntos para monitorizar el estado hídrico del cultivo (figura 2).

Riego automático de precisión: plataforma web Irri_Desk

En los tratamientos T2 y T3, en los puntos de control previamente seleccionados, se instalaron una serie de sensores para llevar a cabo el riego automático de precisión (figura 3) a través de la plataforma web Irri_Desk. Inicialmente se introdujo un plan de campaña en el cual se indicaban los volúmenes máximos, y mínimos de agua a aplicar durante todo el ciclo de cultivo. En este caso la cantidad máxima aportada al cultivo debía ser 500 mm (figura 4). Estos límites establecen el rango dentro del cual se deben mantener las dotaciones de riego, de forma que el sistema tiene libertad para ajustar el riego en función de las condiciones específicas de cada punto de control en campo (sondas de humedad y estado hídrico de la planta).

En cada punto de seguimiento manejado por Irri_Desk se monitorizó el contenido de agua en el suelo con tres 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 tres sensores a 20 cm de profundidad y separados 10 cm del gotero en posición horizontal hacia la cama (figura 3). Los volúmenes de riego se registraron diariamente mediante medidores digitales de agua (MTKD-M, Zenner, Villaviciosa de Odón, Madrid) instalados en cada tratamiento de riego. Además, se instaló en cada punto de control un sensor térmico apogee SI411(Decagon Devices, Inc., Pullman, EE.UU).

Recolección y calidad

La recolección se realizó el día 24/07/2023.

FIG. 2 Mapa de conductividad eléctrica aparente del suelo (mS/m) a 0-0,5 m.

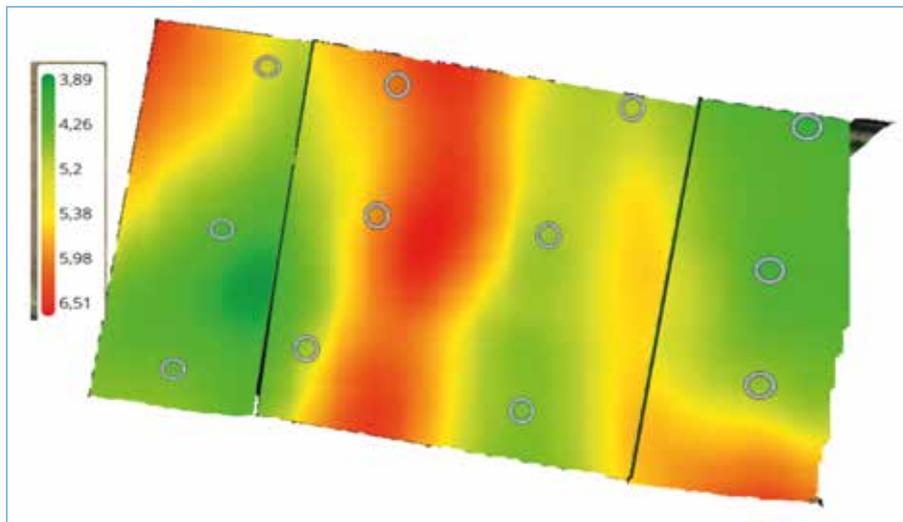


FIG. 3 Esquema de la instalación de los sensores en el campo.

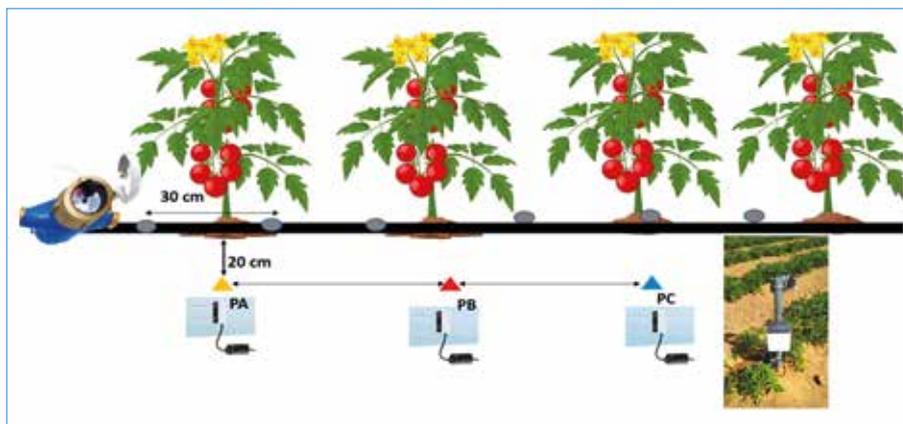
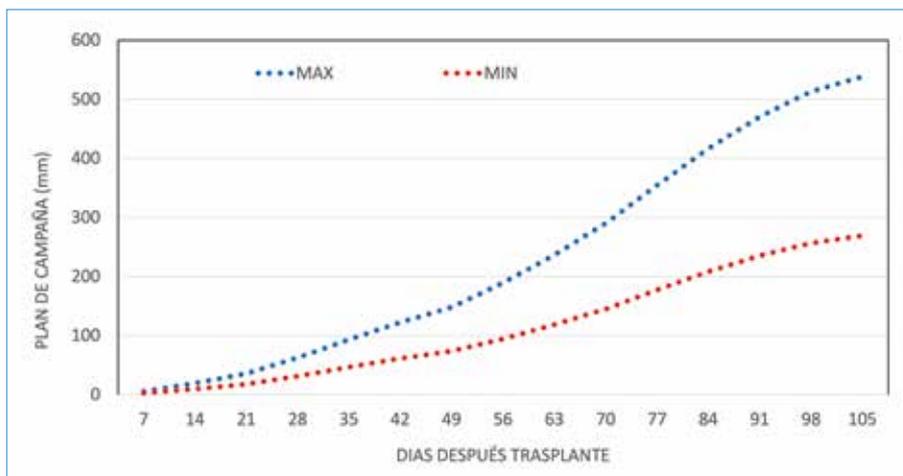


FIG. 4 Valores de agua acumulada máximo (max) y mínimo (min) establecidos inicialmente.

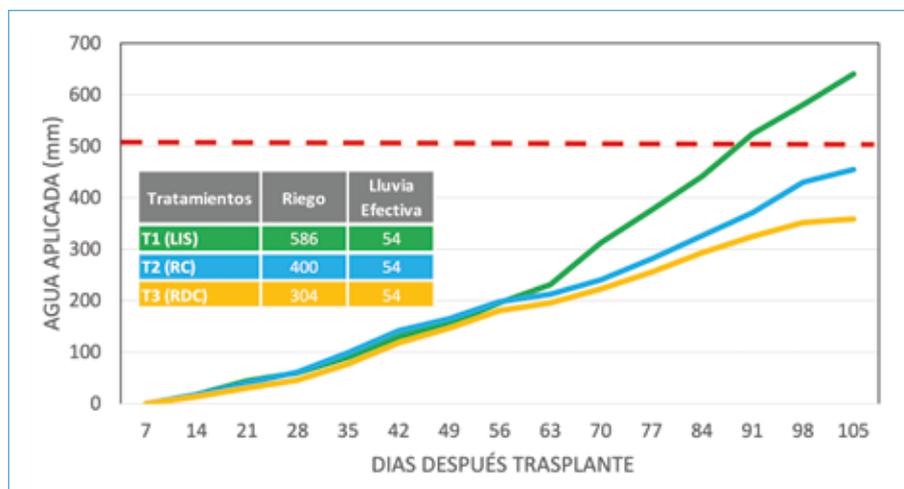


En cada uno de los puntos de control y seguimiento se recolectaron 24 matas en 9 m² y se clasificaron los tomates rojos por un lado como producción comercial y por otro lado los verdes y pasados como producción no comercial o destrío. Al azar, de cada punto se seleccionaron 30 tomates rojos para determinar los °Brix con un refractómetro (Mettler, Toledo, modelo RE4OD).

Resultados

En la **figura 5** se muestra la cantidad de agua aplicada en cada uno de los tratamientos de riego durante toda la campaña de riego en el año 2023. El volumen total fue menor en T2 y T3 que en T1 manteniéndose en ambos casos por debajo del límite de los 500 mm (línea roja) pre-establecido, lo que indica que el sistema

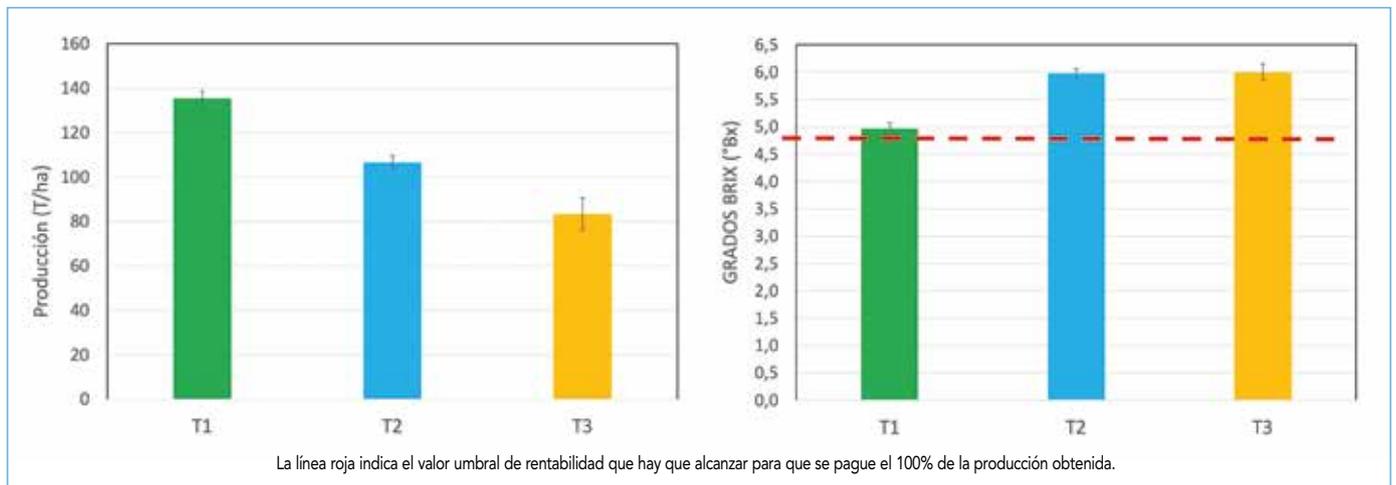
FIG. 5 Agua aplicada en el año 2023 a cada tratamiento de riego.



respondió de forma satisfactoria a la imposición previa establecida. En el T1 se aplicaron 640 mm, un 32% superior al T2 y de un 48% en el caso de T3.

La **figura 6a** muestra la producción comercial en cada uno de los tratamientos del ensayo. Todos los tratamientos se cosecharon con un porcentaje de frutos

FIG. 6 Producción total de tomate en kilogramos por hectárea (a) y parámetro de calidad (°Brix) (b) medido en los diferentes tratamientos.



rojos entorno al 90%. Se observa que la producción en el tratamiento T1 es aproximadamente 135 t/ha, muy superior a los tratamientos T2 y T3. Se observa, en todo caso que los tratamientos T2 y T3 mantienen una producción media superior a la media de la zona en los últimos años (80.000-85000 kg/ha). Se muestra claramente que la estrategia de riego deficitario aplicada en la fase inicial del cultivo en el tratamiento T3, afecta directamente a la producción del cultivo.

La producción obtenida se incrementó con el volumen de agua aplicado, sin embargo, el contenido en sólidos solubles se incrementó considerablemente en los dos tratamientos menos regados. Hay que destacar que entre T2 y T3 no hubo diferencias en °Brix, pero sí una considerable pérdida de cosecha en T3 en relación con T2, al realizar la reducción de riego en fases iniciales de cultivo. La calidad en este cultivo valorada principalmente por ° Brix, es un factor importante a tener en cuenta a la hora de establecer los rendimientos económicos del cultivo, ya que en el caso de valores altos de °Brix se realiza un pago mayor sobre la producción. De esta forma en la **figura 6b** se observan los °Brix obtenidos en los diferentes tratamientos durante la campaña 2023.



Los datos obtenidos muestran que el tratamiento T2 tiene unos mejores ingresos teóricos por oportunidad que el tratamiento T1.

Para este tipo de estudios es fundamental adaptar las estrategias empleadas a la rentabilidad del cultivo para el agricultor. Para ello, sin consideramos los ingresos obtenidos por el agricultor en euros/ha en la aplicación de estrategias de riego deficitario en el tomate de industria, se observa que provocó que en los tratamientos T2 y T3, los °Brix obtenidos sean mayores que en el tratamiento T1, lo que se traduce en un aumento de la rentabilidad del cultivo (**figura 7**). Los euros por hectárea obtenidos en el tratamiento T2 se acercan más a los obtenidos por el tratamiento T1 al aplicarle los incrementos en fábrica por los niveles de °Brix, superiores a 4,8, reduciendo así las diferencias de rentabilidad

obtenidas inicialmente solo considerando la producción comercial.

Además, hay que considerar que, debido a la sequía, los agricultores deben de ajustar las dosis de agua aportada en los cultivos o reducir la superficie de cultivo. Si analizamos con los datos obtenidos cuál sería la opción más rentable y que permitiera hacer un cultivo sostenible medioambiental y económicamente, debemos considerar los ingresos obtenidos por el cultivo y la oportunidad en el uso del agua. Esta oportunidad en el uso del agua es entendida como la rentabilidad obtenida por cada hectárea de terreno en el caso de tener que mantener una dotación de agua inferior a las necesidades del cultivo.

FIG. 7 Ingresos y oportunidad en el uso del agua en euros por hectárea para cada uno de los tratamientos.



En primer lugar, si analizamos la productividad del agua por cada kilo de tomate producido, obtenemos unos valores de 23,12 kg/m³ en T1, 26,67 kg/m³ para T2 y de 27,43 kg/m³ para T3, lo que nos indica que los tratamientos T2 y T3 tienen una productividad del agua mayor que T1. También se ha indicado que, aunque en T2 existió una importante merma de la producción comercial, el aumento de calidad pudo compensar las diferencias de rentabilidad respecto al tratamiento T1, sin restricciones de agua.

En segundo lugar, los volúmenes aplicados en el tratamiento T1 hubieran obligado a reducir la superficie de cultivo en un 25% para ajustarse a las dotaciones establecidas (5.000 m³/ha). Sin embargo, el ajuste en el caso del tratamiento T3 a unas dotaciones de agua inferiores en casi un 50% a T1 permitirían aumentar la superficie en un 25%. En el caso del tratamiento 2, el ajuste de la dotación máxima permitiría mantener la misma superficie con los volúmenes de agua establecidas por superficie.

A partir de la combinación de ambos factores, el aumento de calidad y la posi-

bilidad de mantener o reducir la superficie en función de la dotación, obtenemos los valores de oportunidad en el uso del agua para cada uno de los tratamientos.

Los datos obtenidos muestran que el tratamiento T2 tiene unos mejores ingresos teóricos por oportunidad que el T1 (figura 7). Esto debe ser tenido muy en cuenta a la hora de establecer los parámetros necesarios para la sostenibilidad del cultivo.

Conclusiones

En este estudio se probó un sistema de riego automático de precisión en un cultivo de tomate de industria con la plataforma web Irri_Desk comparado con la gestión de riego realizada de manera manual con la información aportada por un lisímetro de pesada:

- Irri_Desk utilizó un volumen de agua inferior al tratamiento T1 (en torno al 40% de media), adaptándose en cada zona a la información proporcionada por los sensores.
- Permite mantener una buena producción con un límite de agua fijado como objetivo inicial.

- Puede ajustar la programación del riego en función del contenido de agua del suelo y mejorar el uso eficiente del agua.
- Consigue mejorar la calidad del tomate de industria con la consiguiente rentabilidad del cultivo.
- La aplicación de riego deficitario durante la fase inicial del cultivo ha reducido el desarrollo de los cultivos, provocando una disminución significativa de la producción.
- Es necesario identificar los momentos fenológicos más cruciales para evitar situaciones de estrés en épocas sensibles. En este sentido, el uso de sistemas de monitorización del desarrollo de los cultivos con NDVI facilitará un mejor ajuste del desarrollo de los cultivos al plan estacional de riego. ■

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto ET4DROUGHT (PID2021-127345OR-C33) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación en el marco del Programa Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023 y al proyecto DigiSPAC (TED2021-131237B-C22). Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación en el marco de la convocatoria nacional de transición ecológica y digital del plan estatal de investigación científica, técnica y de innovación 2021-2023. Cofinanciados 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.
- Johnstone, P.R., Hartz, T.K., LeStrange, M., Núñez, J.J., y Miyao, E.M. (2005). Manejo de los sólidos solubles de la fruta con riego deficitario al final de la temporada en la producción de tomate para procesamiento con riego por goteo. *HortScience*, 40 (6), 1857-1861.
- 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., Moñino, M. J., Vivas, A., & Prieto, M. H. (2019). Automated irrigation scheduling for drip-irrigated plum trees. In *Precision agriculture'19* (pp. 59-66). Wageningen Academic Publishers.
- 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.