

Análisis del comportamiento de una red colectiva de riego considerando la programación de riego en parcela

Collective irrigation network analysis considering plots irrigation scheduling

Lima, F.A.^{a1}, Córcoles, J.I.^{b1}, Tarjuelo, J.M.^{a2} y Martínez-Romero, A.^{b4}

^aCentro Regional de Estudios del Agua, Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España.
E-mail: ^{a1}aldiellima@gmail.com, ^{a2}jose.tarjuelo@uclm.es

^bEscuela de Ingenieros Industriales de Albacete, Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España.
E-mail: ^{b1}juanignacio.corcoles@uclm.es, ^{b2}angel.mromero@uclm.es

Recibido: 06/02/2018

Aceptado: 04/02/2019

Publicado: 30/04/2019

Citar como: Lima, F.A., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Martínez-Romero, A. (2019). Collective irrigation network analysis considering plots irrigation scheduling. *Ingeniería del agua*, 23(2), 77-87. <https://doi.org/10.4995/la.2019.9517>

RESUMEN

El objetivo del trabajo es implementar una herramienta de simulación para la gestión de una red colectiva de riego, que minimice el coste energético en la estación de bombeo. La metodología propuesta ha sido aplicada en el año 2015 a una red de riego de 550 ha en Castilla-La Mancha para dos manejos de la presión en cabecera (fijo o variable), según el conjunto de tomas abiertas y su localización en la red. La herramienta simula el comportamiento de la red utilizando EPANET[®] partiendo de la programación de riegos de los cultivos del conjunto de parcelas abastecidas por la red utilizando el modelo MOPECO. Los resultados indican que la simplicidad de la gestión de la red con altura de presión fija hace que este sistema sea más interesante que con altura variable, a pesar del ligero incremento de consumo de energía que conlleva, inferior al 2% en los casos analizados.

Palabras clave | estación de bombeo; red hidráulica a presión; costes energéticos; EPANET.

ABSTRACT

The aim of this work is to implement a simulation tool for management of collective irrigation network, than minimizes the energy cost in pumping station. The proposed methodology has been applied in 2015 to an irrigation network of 550 ha in Castilla-La Mancha, for two pressure head managements (fixed or variable), taking into account the open hydrants and their location in the network. The tool simulates the network behavior using EPANET[®], and it is based on the crops irrigation scheduling of the plots calculated with MOPECO model. The results indicate that the use of fixed pressure head management might be more interesting than the variable pressure head, due to its simplicity, despite its slight increase in energy consumption, lower than 2% in the analysed cases.

Key words | pumping station; hydraulic pressure net; energy costs; EPANET.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, dentro del sector agrícola, se está produciendo una importante modernización en los sistemas de riego y de distribución de agua, pasando de los sistemas de riego por superficie a los presurizados (Abadía *et al.*, 2008). Así, el consumo energético adquiere una mayor relevancia en los costes totales de aplicación del agua, siendo necesaria la energía tanto para la extracción como para la distribución y la aplicación del agua en parcela. Asimismo, el aumento en el precio de la energía junto con la problemática de la escasez de agua en muchas zonas establece la necesidad de realizar un uso eficiente de estos recursos (Rodríguez *et al.*, 2007; Pérez Urrestarazu *et al.*, 2010; Knox *et al.*, 2010; Córcoles *et al.*, 2016).

La falta de un preciso conocimiento de la relación agua-energía puede conducir a un aumento de los gastos energéticos (Córcoles, 2009). Este aspecto resulta imprescindible en la gestión de redes colectivas de riego presurizadas con distintas alternativas de manejo con distintas modalidades de riego a turnos o a la demanda. En el caso de redes de riego a la demanda, si los agricultores no realizan una adecuada programación del riego en parcela se puede producir un uso ineficiente del agua (Ortega *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2010), así como un aumento significativo en el consumo de energía (Rodríguez Díaz *et al.*, 2009) y por tanto en los costes de producción.

En este tipo de redes, el caudal circulante por las líneas es muy variable a lo largo de la campaña de riegos, dependiendo, entre otros, de la distribución de cultivos en la zona regable, de la fase de desarrollo fenológico en que se encuentren los cultivos, de las condiciones meteorológicas, de la eficiencia de aplicación de los sistemas de riego y de la planificación del riego por los agricultores. Es posible, que en ciertos períodos, en la estación de bombeo (EB) no se pueda garantizar el suministro del caudal y/o la presión del agua requeridos para el correcto funcionamiento de todos los hidrantes abiertos en la red, debido al aumento del tiempo de riego en las parcelas (justificado por un incremento de las necesidades hídricas de los cultivos, o el manejo individual en parcela), o en el número de tomas abiertas simultáneamente a determinadas horas del día o en determinados días de la semana. De esta forma, se requiere un mayor caudal, y consecuentemente mayor potencia de la EB, pudiendo derivar en posibles fallos de suministro si la EB no está correctamente dimensionada (Planells *et al.*, 2001).

Por otra parte, los requerimientos de riego de los cultivos, son independientes de la red de distribución de agua. Para determinarlos hay que establecer una programación de riegos teniendo en cuenta aspectos climáticos, edáficos y de cultivo, principalmente (Allen *et al.*, 1998). Existen programas de uso extendido para determinar una programación de riegos sin déficit como CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003) o para simular la respuesta del cultivo al estrés hídrico como AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009), pero sólo el modelo MOPECO (Domínguez *et al.*, 2012a) calcula una programación de riegos que optimiza el rendimiento del cultivo para una cantidad de agua disponible, cuando ésta es menor o igual a los requerimientos máximos del cultivo. Este modelo está indicado para establecer programaciones de riego deficitario, especialmente en zonas donde el agua es el factor limitante.

El objetivo del trabajo es implementar una herramienta de simulación para la gestión de una red colectiva de riego que permite establecer la hora de inicio del riego en cada parcela para minimizar el coste de la energía eléctrica. Esta herramienta contempla la programación de riego en cada parcela (establecida mediante el modelo MOPECO), junto con la gestión de la red de distribución de agua y de la estación de bombeo utilizando el motor de cálculo de EPANET.

MATERIAL Y MÉTODOS

Caso de estudio

La metodología propuesta ha sido aplicada en una Comunidad de Regantes (CCRR) de Castilla-La Mancha (Albacete, España). El clima de la zona según la clasificación de Thornthwaite (1948), es semiárido con una precipitación media anual entre 300 y 400 mm, y una temperatura media de medias anual de 12.4 °C. Se caracteriza por inviernos fríos (con temperaturas medias de mínimas próximas a los 0 °C) y veranos cálidos (con temperaturas medias de máximas próximas a los 35 °C), según la clasificación de Köppen.

La zona regable de 1044 ha, está compuesta por dos redes colectivas de riego a la demanda independientes (sector I y sector II). En el sector de estudio (sector I), el agua se distribuye mediante un grupo de rebombeo compuesto por 9 bombas iguales (140 CV por bomba) conectadas en paralelo, dos de ellas con variador de velocidad (Tabla 1). La estación de bombeo funciona con regulación manométrica en cabecera, con presión fija alrededor de 51 m. Generalmente, la EB trabaja las 24 h durante toda la campaña de riego, incluido en los períodos de tarifas más caras, para mantener la red en carga.

Tabla 1 | Características hidráulicas del sector I.

Características	Sector I
Superficie regable (ha)	550.2
Número de hidrantes	389
Volumen del embalse (m ³)	23.0×10 ³
Número de sondeos	4
Numero de bombas para el rebombeo	9
Potencia de las bombas para el rebombeo (CV)	140
Longitud total de tuberías (m)	30.5×10 ³

En las parcelas del sector I, hay dos tipos de sistemas de riego, aspersión y por goteo. Los sistemas de riegos por aspersión fija a marco 17.3×17.3 m son predominantes en la zona, con más del 60% de la superficie regada.

En el año 2015 se ha identificado la distribución de los cultivos, con predominio de cultivos como la cebada (30%), vid (14%), trigo (9%) maíz (6%) y cebolla (5%).

Metodología aplicada

Para gestionar una red colectiva de riego y su estación de bombeo con el fin de minimizar el coste de la energía eléctrica se ha partido de las necesidades establecidas por la programación de riegos en parcela establecida por el modelo MOPECO (Modelo de Optimización Económica del riego) (Domínguez *et al.*, 2012a). Una herramienta implementada en MATLAB® R2013b (Pratap, 2010; Lima, 2017) permite simular el comportamiento hidráulico de la red de distribución de agua y de la estación de bombeo para múltiples escenarios planteados (Figuras 1 y 2). Para determinar las necesidades de caudal y presión en cabecera, esta herramienta utiliza el motor de cálculo de EPANET (Rossman, 2000), partiendo de una red calibrada. La herramienta establece la hora de apertura de las tomas en la red que conduce al menor coste energético. En la Figura 1, se muestra un esquema de la metodología utilizada que implementa ambas herramientas, con las que se han simulado los diversos escenarios de riegos planteados en la campaña 2015.

Durante la campaña 2015, se han instalado equipos para controlar parámetros hidráulicos y eléctricos de la red y caracterizar su funcionamiento. En relación a los parámetros hidráulicos, se ha controlado la presión durante toda la campaña de riego en distintos niveles: a la salida de la estación de bombeo, en 4 parcelas de seguimiento de los cultivos y en 3 puntos estratégicos de la red, donde las evoluciones de las presiones son proporcionales a las registradas a la salida de la estación de bombeo, y pueden utilizarse como puntos de control de la red (Córcoles *et al.*, 2016). En todos los casos se ha almacenado un registro cada dos minutos de la presión, utilizando transductores de presión (Druck, Leicester, UK), con un rango de medida de 0 a 6 bar, conectados a un “datalogger” (Dickson, Addison, In, USA) para el registro de los datos, y una fuente de alimentación externa, compuesta por una batería de 12 V. Antes de la instalación en los puntos de medida, se ha realizado la calibración de los transductores a través de un manómetro digital (2023P7 Digitron®) de precisión de 0.01 bar.

En el caso de los parámetros eléctricos, se instaló un analizador de redes, modelo QNA-412 (Circutor, España), situado entre el transformador de media a baja tensión y la entrada a la estación de bombeo que alimenta a la red. Con este equipo ha sido posible determinar cualquier incidencia de funcionamiento durante la campaña, relacionado con la calidad del suministro eléctrico (sobretensiones, huecos e interrupciones, etc.), así como de los principales parámetros eléctricos tales como tensión (V), intensidad

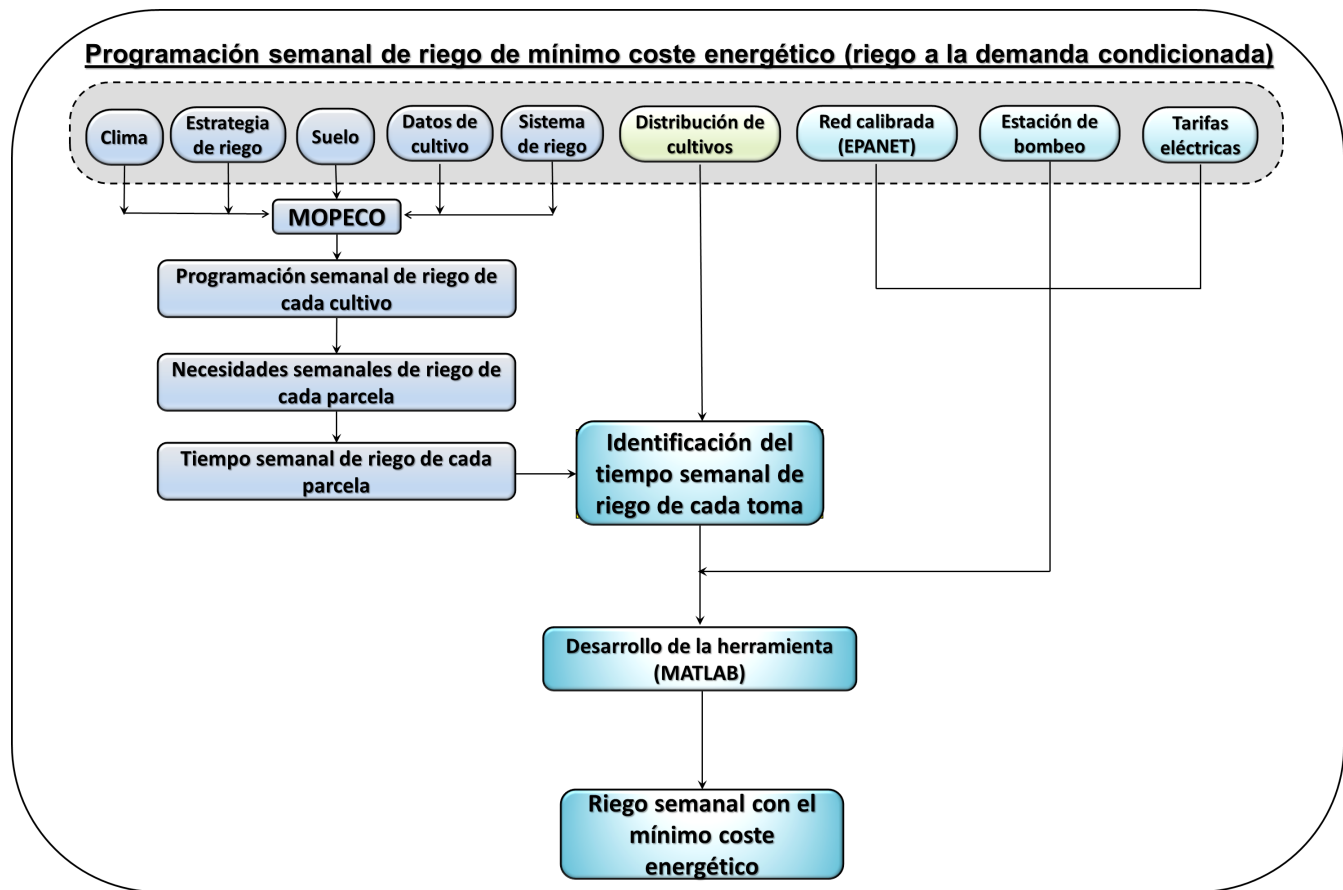


Figura 1 | Esquema de la metodología aplicada.

de corriente (A), potencia activa y reactiva (kW), energía activa y reactiva (kWh), y frecuencia (Hz), entre otros. Además de la monitorización continua de la estación de bombeo, al inicio de la campaña de riego se midió el consumo energético de cada una de las bombas de forma individualizada, incluida la de variador de velocidad para distintos puntos de trabajo, relacionándolo con el caudal y presión a la salida del bombeo. Para ello, se ha utilizado un analizador de redes modelo AR5 (Circutor, España) tanto en las bombas accionadas con variador de velocidad como en las bombas fijas, utilizándolos de forma continuada durante la campaña, con intervalos de registro de parámetros eléctricos cada 10 minutos. En cada una de las bombas que componen la estación de bombeo se ha determinado el caudal descargado utilizando un caudalímetro de ultrasonidos (PANAMETRICS® PT878), de forma sincronizada con el analizador.

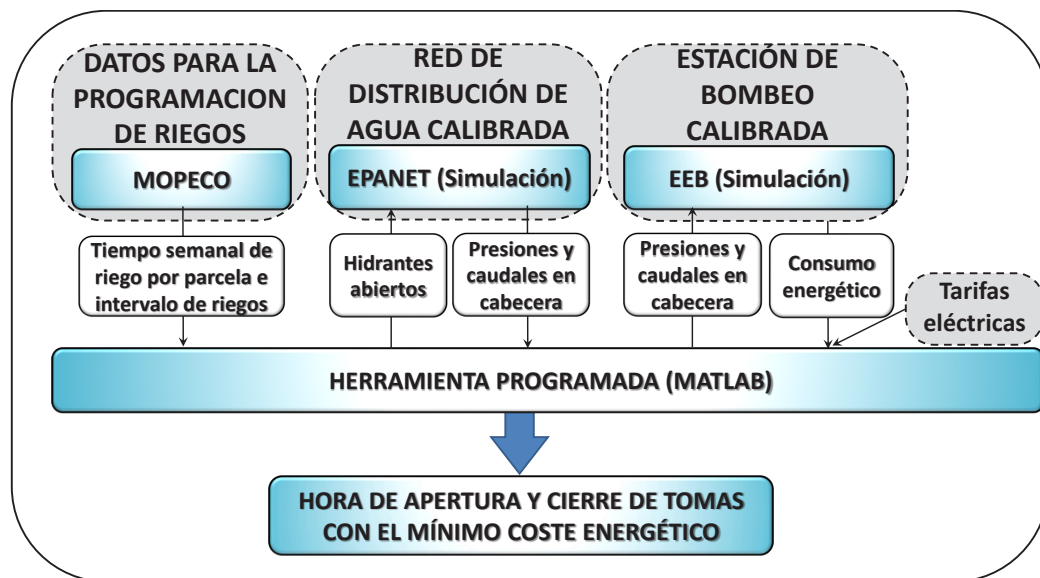
Para simular la respuesta de la EB, a partir de los datos medidos para el proceso de calibración, se han planteado en la herramienta dos condiciones de manejo de presión en cabecera, con presión fija y con la presión variable. Estas presiones en cabecera tienen que garantizar en cada situación de demanda simulada, la presión mínima en todos los hidrantes abiertos en cada momento.

A partir de la distribución de los cultivos en parcela y con los datos climáticos registrados en una estación agroclimática completa (SiAR, 2016), se ha determinado los calendarios de riego de los cultivos implantados en la zona con MOPECO, planteando dos programaciones de manejo de riego en parcela que demanden distinto volumen de agua, una sin déficit y otra con déficit hídrico en los cultivos. Según los calendarios de riego establecidos para el cultivo de cada parcela, la herramienta simula, en periodos de una semana, los días y las horas de apertura y cierre de cada toma de la red.

El nivel de estrés global asignado a cada cultivo se ha realizado atendiendo a criterios económicos, de disponibilidad de agua y de manejo en el área de influencia del acuífero Mancha Oriental, planteando déficits moderados de entre el 20% y el 30%

(Domínguez *et al.*, 2012ab; Domínguez *et al.*, 2013; Domínguez *et al.*, 2017). La programación de riegos por cultivo en esta estrategia se ha establecido aplicando la metodología de Riego Deficitario Optimizado por Etapas (ORDI). Para un escenario de déficit hídrico planteado, donde el agua disponible para regar es inferior a las necesidades máximas del cultivo, lo que conlleva a que la Evapotranspiración real del cultivo (ET_a) sea inferior a la máxima (ET_m) (ET_a/ET_m acumulada en el ciclo < 1) y el del cultivo rendimiento disminuya, se han establecido unas relaciones ET_a/ET_m objetivo en cada etapa del cultivo, que maximizan el rendimiento (Domínguez *et al.*, 2012b).

Para realizar la distribución de tomas abiertas que permitan satisfacer las necesidades de riego semanales de los cultivos se han realizado las programaciones de riego a partir del primer riego que se efectúa durante el fin de semana (sábado y domingo) que corresponde a horas valle, y es el único periodo donde se puede regar de día, aprovechando para poder controlar visualmente el funcionamiento de las instalaciones. El resto de necesidades de riego se completa con horas valle de lunes a viernes (entre las 00:00 y las 8:00 h). Las programaciones de riego se establecieron, atendiendo a criterios agronómicos y de manejo del riego e independientemente del manejo de la red, preestableciendo intervalos de riego de entre 2 y 4 días según las características en cada parcela (cultivo y estado fenológico los mismos, condiciones climáticas, sistemas de riego y tipo de suelo), tal como se maneja en la zona. Para determinar la hora de inicio del riego en cada una de las parcelas durante el fin de semana se genera un escenario aleatorio de apertura de tomas. Con el fin de tener un número elevado de momentos de inicio del riego en parcela, el periodo de riego correspondiente al fin de semana (un total de 48 horas) se divide en intervalos de 15 minutos. Dentro de un rango de múltiples escenarios aleatorios de las horas de apertura de las tomas en parcela cada día, se ha seleccionado aquel escenario que minimiza el coste energético en la estación de bombeo. En la Figura 2 se representa la conexión de la herramienta desarrollada en MATLAB con los motores de cálculo utilizados para determinar la hora de apertura y cierre de tomas con el mínimo coste energético.



EEB: Eficiencia de la estación de bombeo.

Figura 2 | Esquema de la herramienta programada en MATLAB con los distintos motores de cálculo utilizados (EPANET, MOPECO Y EEB).

Con relación a la presión en cabecera, una de las estrategias de manejo, que coincide con la actualmente seguida por los gestores de la red, ha sido establecer una presión de trabajo constante en cabecera de 52 m, que coincide con las medias de las presiones registradas por los transductores de presión en la campaña 2015 (51.5 m). En la otra estrategia de regulación se considera una presión variable en cabecera según el caudal demandado, para garantizar una presión mínima de 35 m en la toma más desfavorable de la red, teniendo en cuenta que todas las tomas tienen un limitador caudal ajustado a su dotación.

RESULTADOS

Para mostrar el funcionamiento de la herramienta, en la campaña 2015 se ha simulado el comportamiento de la red para las dos estrategias de riego, una sin déficit y otra con déficit, tanto en una semana de baja demanda (del 2 de marzo hasta 8 de marzo) como en otra de alta demanda (del 18 de mayo hasta 24 de mayo) (Figuras 3 a 7).

En la Figura 3 se muestra la evolución del caudal suministrado a la red para las dos estrategias de altura de presión en cabecera fija o variable, así como para una semana de alta y otra de baja demanda, y para programación de riegos en los cultivos con y sin déficit. El caudal máximo demandado en los riegos deficitarios (130 L s^{-1}) (Figura 3b) para la semana de baja demanda es alrededor de un 66% menor que en el escenario de riego sin déficit (381 L s^{-1}) (Figura 3a). En ambos casos, estos máximos se registran durante el fin de semana. Para la semana de alta demanda, los caudales máximos en los manejos con y sin déficit (558 y 1045 L s^{-1}) se presentan en un día entre semana (miércoles) (Figura 3c y 3d).

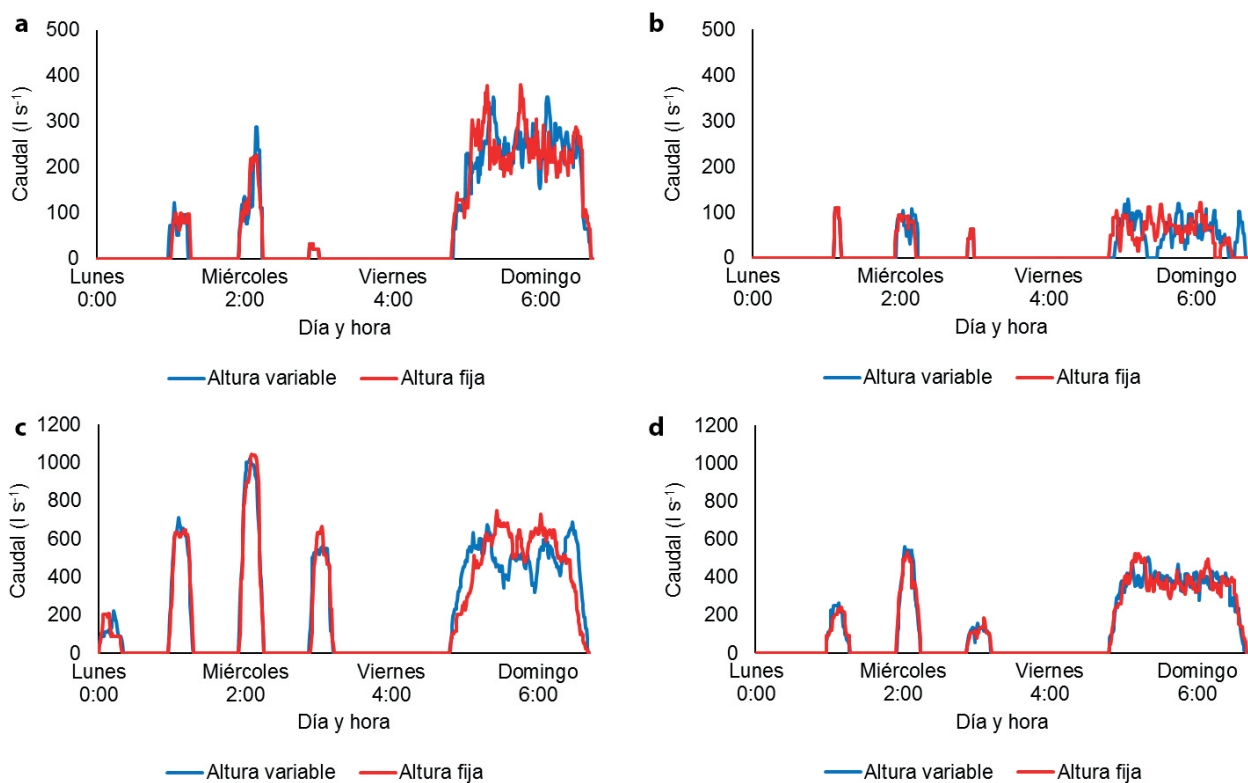


Figura 3 | Evolución de los caudales simulados para una semana en periodos de baja demanda (sin déficit (a) y con déficit (b)) y alta demanda (sin déficit (c) y con déficit (d)).

En la Figura 4 se muestra la evolución de las presiones en cabecera de la red, para las semanas de baja y alta demanda (Figuras 4a y 4b). En ambos casos, la presión variable necesaria en cabecera para garantizar la presión mínima en todos los hidrantes abiertos en un momento determinado no supera los 52 m del escenario de presión fija, donde los máximos de presión en cabecera han sido de 45.2 m para la semana de baja demanda y de 51.6 m para la de alta demanda, utilizando la estrategia de riego sin déficit en ambos casos que es la situación más desfavorable al presentar mayor acumulación de caudales.

Los rendimientos medios diarios de funcionamiento de la estación de bombeo correspondientes a la simulación de las semanas de baja demanda (Figuras 5a y 5b) y alta demanda (Figura 5c y 5d) son diferentes para los manejos con presión fija y variable en cabecera. En la semana de baja demanda para el escenario sin déficit, los rendimientos medios varían entre el 61% y el 64% para altura de presión variable y entre el 68% y el 71% en la altura fija (Figura 5a), mientras que, en el escenario de riegos

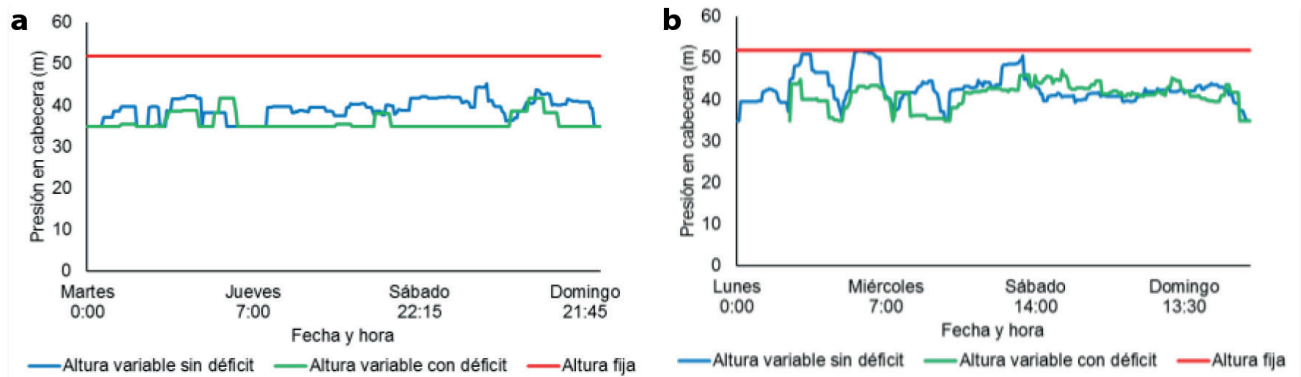


Figura 4 | Evolución de la presión en cabecera para una semana de baja demanda (a) y alta demanda (b).

deficitarios, estos valores son de 48% a 66% y de 53% a 71%, utilizando presión variable y fija (Figura 5b) respectivamente. Los mayores rendimientos para la presión fija de 52 m en cabecera indican una mejor adaptación de las curvas características de estas bombas que a presiones menores, poniéndose de manifiesto que, en este caso, un aumento de presión no supone un aumento excesivo del consumo de energía.

En la semana de alta demanda, para el escenario sin déficit, los rendimientos medios varían entre el 53% y el 60% con presión variable en cabecera, y entre el 59% y el 61% para presión fija (Figura 5c). Para el escenario de riegos deficitarios la eficiencia media en la estación de bombeo varía entre el 54% y el 65% para el caso de presión variable, y del 61% al 72% para presión fija (Figura 5d).

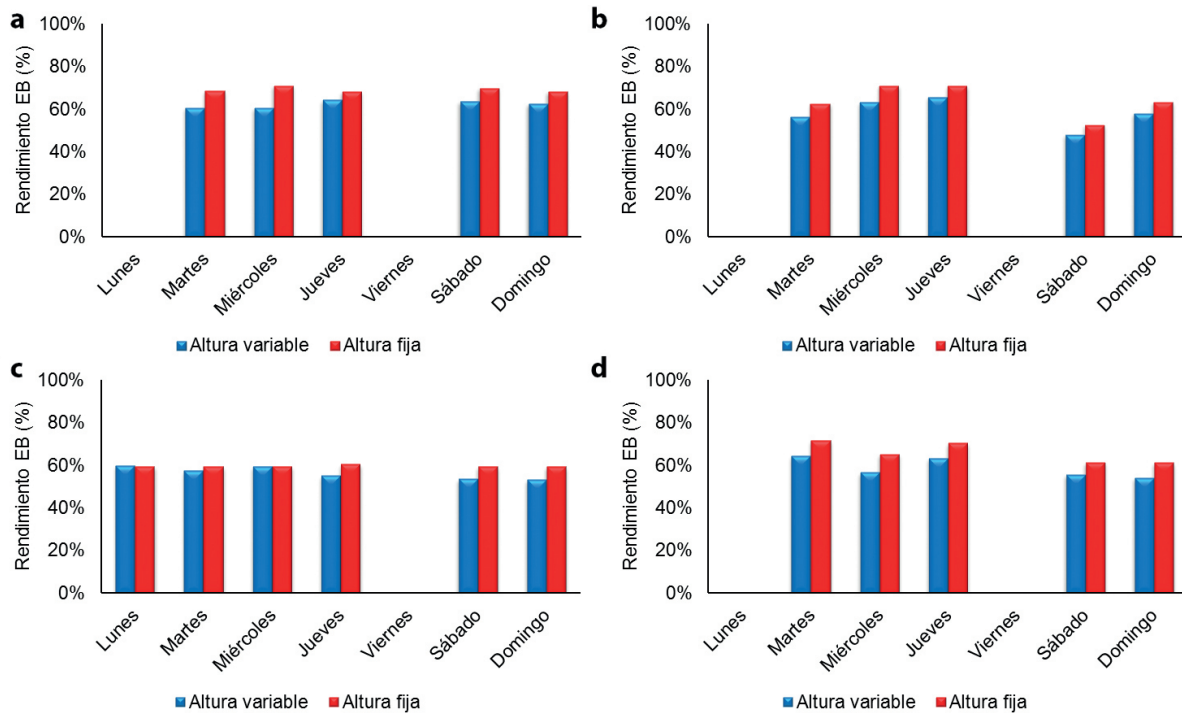


Figura 5 | Rendimientos medios diarios en la estación de bombeo para una semana de baja demanda (sin riego deficitario (a) y con riego deficitario (b)), y de alta demanda (sin riego deficitario (c) y con riego deficitario (d)).

En relación al consumo energético (kWh), en la Figura 6 se muestra su evolución para una semana de baja demanda con las estrategias de riego sin déficit y con déficit (Figuras 6a, y 6b, respectivamente), así como para una semana de alta demanda con estrategia de riego sin déficit y deficitario (Figuras 6c y 6d, respectivamente), apreciándose unas grandes diferencias en el consumo de energía entre semanas de baja y alta demanda de riego.

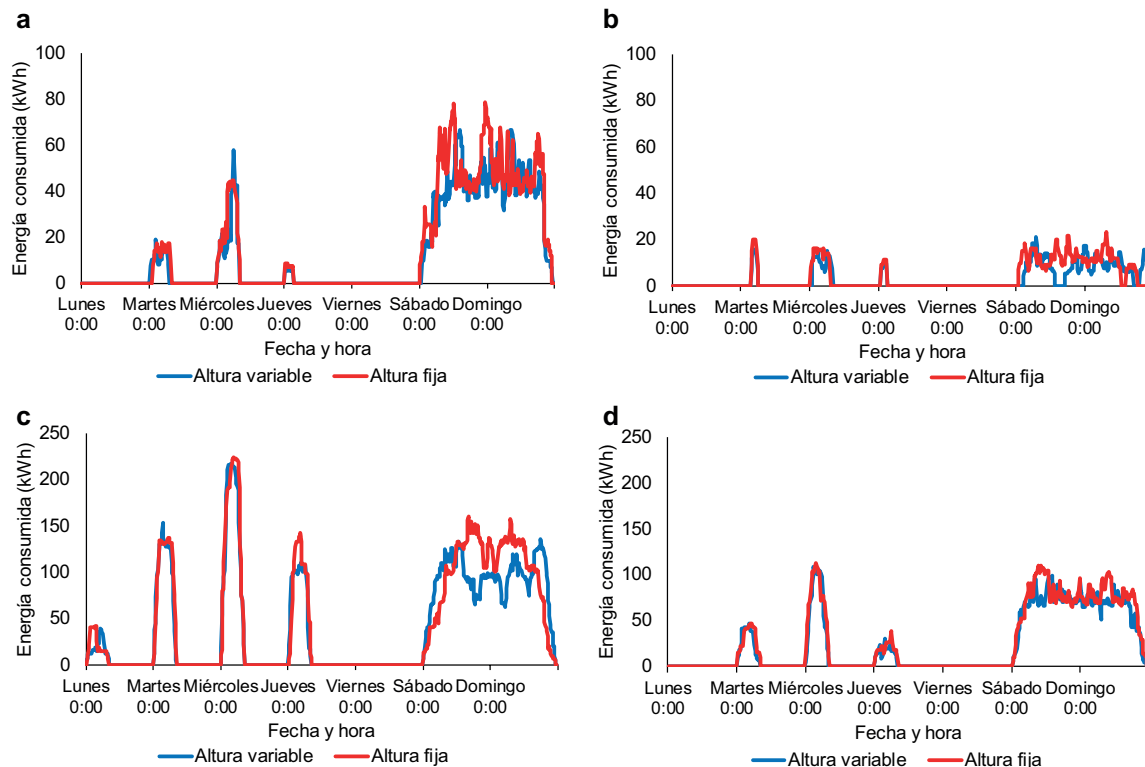


Figura 6 | Evolución del consumo energético para una semana de baja demanda (sin riego deficitario (a) y con riego deficitario (b)) y de alta demanda (sin riego deficitario (c) y con riego deficitario (d)).

Así, los máximos consumos de energía registrados en la semana de baja demanda superan los 79 kWh (Figura 6a) para riegos sin déficit y 23 kWh (Figura 6b) para riegos deficitarios, mientras que en la semana de alta necesidad de riegos, estos valores superan los 224 kWh (Figura 6c) para el escenario de riegos sin déficit y solo 113 kWh (Figura 6d) para la de riego deficitario. Los valores más elevados de consumo de energía se registran cuando se utiliza una regulación de presión fija en cabecera con respecto a la presión variable, siendo entre un 14% y un 24% mayores en una semana de baja demanda, y alrededor del 10% en una de alta demanda, por lo que la diferencia depende también del caudal demandado. En la estación de bombeo, para un manejo real de la red con un consumo de agua similar al de la estrategia de riego deficitario, se midieron consumos de energía máximos superiores a los que se obtendrían utilizando la herramienta propuesta. Estos datos medidos fueron de hasta 400 kWh para semanas de baja demanda (concentrándose el consumo únicamente durante los fines de semana) y de entre 400 y 500 kWh en semanas alta demanda, llegando en este último caso hasta los 600 y 700 kWh en momentos puntuales debido a altas concentraciones de caudales.

En la Figura 7, se muestran los costes diarios de la energía consumida para las semanas simuladas. Para la semana de baja demanda, los mayores costes se registran en el fin de semana, con valores superiores a los 200 € día⁻¹ (Figura 7a) al utilizar altura de presión fija y riegos sin déficit. Para la semana de alta demanda el coste es de 486 € día⁻¹ en el sábado y 479 € día⁻¹ para el domingo, en el escenario de altura fija y riegos sin déficits. Los costes actuales en la estación de bombeo fueron por unidad de volumen bombeado aproximadamente un 50% superiores a los estimados con el manejo proporcionado por la herramienta.

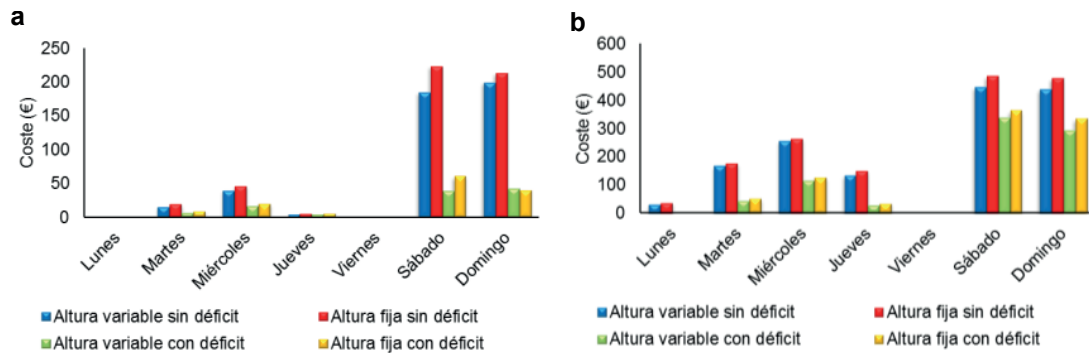


Figura 7 | Distribución de los costes simulados de energía eléctrica durante la semana de baja (a) y alta (b) demanda en 2015.

DISCUSIÓN

Con respecto a la evolución del caudal semanal, se ha constatado que en el período de baja demanda los valores son inferiores a los correspondientes para una semana de alta demanda (Figura 3). La variación de las condiciones climáticas y del estado de desarrollo fenológico de los cultivos junto con el manejo del riego condicionado a la variación de los costes de la energía eléctrica a diferentes horas del día y en los diferentes días de la semana originan importantes variaciones del caudal demandado a la estación de bombeo. Esto conlleva variaciones en el rendimiento de las bombas según su punto de funcionamiento y concentración del consumo de energía en las horas de menor coste.

En cuanto a la altura de presión en cabecera, los valores obtenidos en el escenario de presión variable según el caudal demandado han estado siempre por debajo a los 52 m del escenario de presión fija, aunque muy próximo a ese valor en periodos de gran demanda. Esto sugiere que podría establecerse una presión fija en cabecera de unos 45 m en periodos de baja demanda (Figura 4) y subirla a 52 m en los de alta demanda, pero habría que estar pendiente de realizar esos cambios en el sistema de control de la estación de bombeo.

Los rendimientos medios medidos en la estación de bombeo son algo mayores cuando las bombas trabajan a la altura fija de 52 m (Figura 5), lo que hace que el sistema de regulación con altura de presión fija en cabecera pueda resultar más interesante que el de altura de presión variable al ser mucho más sencillo de implementar, aunque los costes se eleven. Así, el manejo con altura fija, conlleva un incremento de los costes en la estrategia sin déficit de un 14% y un 8% para una semana de baja y alta demanda respectivamente, y en la estrategia con déficit, de un 24% y un 11% respectivamente.

CONCLUSIONES

La herramienta desarrollada pretende servir de ayuda en la toma de decisiones para la gestión de redes colectivas de riego, reuniendo el paso de un sistema de riego a la demanda, donde cada agricultor decide el momento y la duración de sus riegos, a un sistema de demanda condicionada, donde el gestor de la red atiende las demandas de los agricultores, pero optimiza el manejo de la red para reducir el coste de agua y de energía consumidos. Con el uso de esta herramienta se tiene en cuenta la programación semanal del riego en parcela, y permite identificar la secuencia de apertura y cierre de cada una de las tomas de las parcelas para conseguir el mínimo coste energético en la estación de bombeo.

La adecuada distribución de tomas abiertas y la hora de apertura de cada una de ellas realizada con la herramienta de simulación permite optimizar distribución de caudales en la red, garantizando en todo momento el caudal y presión necesario en cada hidrante, incluido en los de alta demanda de riego, aspecto este que no siempre se consigue cuando los agricultores gestionan su riego de forma individualizada.

La utilización de altura fija en cabecera de 52 m, a pesar de mostrar un rendimiento medio más elevado que la regulación con altura variable, conduce a un mayor consumo de energía y coste energético si se compara con la altura variable en cabecera, pero resulta un sistema de regulación muy útil e interesante dada su sencillez.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO) AGL2014-59747-C2-1-R (cofinanciado con fondos FEDER) y al proyecto de la Unión Europea IBRASIL Project (Inclusive and Innovative Brazil Erasmus Mundus Programme) por el apoyo financiero, a través de la beca de estudio de doctorado.

REFERENCIAS

- Abadía, R., Rocamora, C., Ruiz-Canales, A., Puerto, H. (2008). Energy efficiency in irrigation distribution networks I: theory. *Biosystems Engineering*, 101(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.05.013>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guide-lines for computing crop water requirements. Paper No. 56. FAO, Italy.
- Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A. (2016). Pumping station regulation in on-demand irrigation networks using strategic control nodes. *Agricultural Water Management*, 163, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.001>
- Córcoles, J.I. (2009). *La gestión del agua y la energía en el regadío mediante técnicas de "Benchmarking"*. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Universidad Castilla-La Mancha. Albacete, España. <https://doi.org/10.18239/vdh.v0i6.311>
- Domínguez, A., Martínez-Navarro, A., López-Mata, E., Tarjuelo, J.M., Martínez-Romero, A. (2017). Real farm management depending on the available volume of irrigation water (part I): Financial analysis. *Agricultural Water Management*, 192, 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.022>
- Domínguez, A., Martínez-Romero, A., Leite, K.N., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A., López-Urrea, R. (2013). Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in central Spain. *Agricultural Water Management*, 130, 154-167. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.024>
- Domínguez, A., Martínez, R.S., de Juan, J.A., Martínez-Romero, A., Tarjuelo, J.M. (2012a). Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 107, 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.006>
- Domínguez, A., Jiménez, M., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A., Martínez-Romero, A., Leite, K.N. (2012b). Simulation of onion crop behavior under optimized regulated deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 113, 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.019>
- Knox, J., Morris, J., Hess, T. (2010). Identifying future risks to UK agricultural crop production: putting climate change in context. *Outlook on Agriculture*, 39, 249-256. <https://doi.org/10.5367/oa.2010.0016>
- Lima, F.A. (2017). *Modelo de gestión de una red colectiva de riego a la demanda mediante control de la programación de riego en parcela*. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España. <https://doi.org/10.7127/iv-inovagri-meeting-2017-res5911030>
- Moreno, M.A., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Ortega, J.F. (2010). Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering*, 107(4), 349-363. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.09.009>

- Ortega, J.F., de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M. (2005). Improving water management: the irrigation advisory service of Castilla-La Mancha (Spain). *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 37-58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.028>
- Pérez Urrestarazu, L., Smout, I., Rodríguez, J., Carrillo-Cobo, M. (2010). Irrigation distribution networks. Vulnerability to climate change. *Journal Irrigation Drainage Engineering*, 136(7), 486-493. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000210](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000210)
- Planells, P., Tarjuelo, J.M., Ortega, J.F., Casanova, M.I. (2001). Design of water distribution networks for on-demand irrigation. *Irrigation Science*, 20(4), 189-201. <https://doi.org/10.1007/s002710100045>
- Pratap, R. (2010). *Getting Started with Matlab. A Quick Introduction for Scientist and Engineers*. Oxford University Press, USA.
- Rodríguez, J.A., Camacho, E., López, R. (2007). Model to forecast maximum flows in on-demand irrigation distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(3), 222-231. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:3\(222\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:3(222))
- Rodríguez-Díaz, J. A., López Luque, R., Carrillo Cobo, M. T., Montesinos, P., Camacho Poyato, E. (2009). Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. *Biosystems Engineering*, 104(4), 552-561. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.001>
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2, users' manual*. Water supply and Water Resources Division. National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati.
- SiAR. (2016). Consulta de datos meteorológicos. Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla-La Mancha. Albacete, España. <http://crea.uclm.es/siar/datmeteo/>. Acceso en 07 de octubre de 2016.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelsol, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 289-307. [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(02)00109-0)
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>