



# App para la programación del riego y la fertilización del olivar regado con agua regenerada

C. Alcaide Zaragoza <sup>1</sup>, I. Fernández García<sup>2</sup>, R. González Perea<sup>3</sup>, E. Camacho Poyato<sup>4</sup>,  
P. Montesinos Barrios<sup>5</sup>, J.A. Rodríguez Díaz <sup>6</sup>

- <sup>1</sup> Investigador predoctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; g12alzac@uco.es
- <sup>2</sup> Profesora Sustituta Interina, Departamento de Ingeniería eléctrica, Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci; g52fegai@uco.es
- <sup>3</sup> Investigador Juan de la Cierva. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Universidad de Castilla-La Mancha, Campus universitario s/n, 02071. Albacete; Rafael.GonzalezPerea@uclm.es
- <sup>4</sup> Catedrático. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; ecamacho@uco.es
- <sup>5</sup> Catedrática. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; pmontesinos@uco.es
- <sup>6</sup> Profesor Titular. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba; jarodriguez@uco.es

**Resumen:** El olivar es el cultivo más representativo y simbólico de Andalucía, teniendo un gran impacto social, cultural y económico en toda la región. Sin embargo, debido a su gran extensión, aproximadamente 1 de cada 3 ha es de riego, y, pese a que se riega de forma deficitaria, es el cultivo con mayor consumo de agua en la Cuenca del Guadalquivir. A esto hay que añadir que, generalmente, la aplicación de fertilizantes suele ser poco precisa, dando lugar a una aportación excesiva de macronutrientes esenciales, especialmente de nitrógeno, lo que provoca problemas de contaminación de acuíferos, suelos y atmósfera. El empleo de aguas regeneradas para el riego de olivar está suscitando gran interés como alternativa al uso de fuentes de aguas convencionales. El problema asociado al riego con este tipo de aguas es la gestión de la fertilización, ya que esta agua incorpora una cantidad considerable de nutrientes que, además, es variable a lo largo del año. Por ello, en este trabajo, se ha desarrollado una aplicación de fácil manejo para técnicos y agricultores que integra la programación en tiempo real del riego y de la fertilización (fertirriego) de olivar para el caso específico del uso de agua regenerada. El modelo en el que se fundamenta la aplicación tiene en cuenta datos climáticos, tanto históricos como predictivos, características del suelo, características hidráulicas del sistema de riego, dotación concedida, análisis del estado nutritivo del árbol y análisis continuos de la calidad del agua. Como resultado, la aplicación genera la programación diaria o semanal del riego y la fertilización, priorizando la aplicación del agua en los momentos en los que el cultivo es más sensible al estrés hídrico.

**Palabras clave:** Reutilización, Riego de precisión, Fertirriego, Programación del riego

## 1. Introducción

En España, más del 75% del agua dulce total distribuida va destinada a la agricultura de regadío [1], lo que provoca que ésta sea especialmente vulnerable ante periodos de sequía. Este

problema se agudiza si se consideran los efectos del cambio climático, los cuales están causando importantes alteraciones en los patrones de lluvia y temperatura, así como un aumento en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos [2]. Esto provocará un aumento en la demanda de agua y en el déficit de agua en el suelo, convirtiendo a España en uno de los países con mayor estrés hídrico del mundo [3]. Por todo esto, la agricultura de regadío tendrá que evolucionar para hacer frente a estos desafíos. Esta situación se agudiza en Andalucía, ya que la agricultura es uno de los pilares de su economía. En esta región, el olivar es el cultivo más representativo y simbólico, teniendo un gran impacto social, cultural y económico. Sin embargo, debido a su extensión, y pese a seguir estrategias de riego deficitario, el olivar es el cultivo con mayor uso de agua en la Cuenca del Guadalquivir, con un consumo de más de 580 hm<sup>3</sup>/año, lo que implica alrededor del 20% del total del agua destinada a agricultura [4]. Por otro lado, la fertilización de este cultivo, generalmente, se realiza de forma poco precisa, siguiendo prácticas culturales tradicionales y sin métodos de diagnóstico previos sobre el estado nutritivo del árbol o análisis sobre la calidad de agua. Esto provoca que se realice una fertilización en exceso, especialmente de nitrógeno, lo que ocasiona no solo pérdidas económicas sino también problemas medioambientales como contaminación de acuíferos, del suelo y de la atmósfera [5]. Esta situación puede agravarse para el caso de riego con aguas regeneradas, ya que dichas aguas ya incorporan una cantidad importante de nutrientes, siendo ésta además variable a lo largo del año. Sin embargo, la utilización de este tipo de aguas, gestionadas correctamente y con ayuda de los nuevos avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs), puede convertirse en una solución estratégica a la problemática planteada [6].

Las aguas residuales tratadas son aguas de origen doméstico, municipal, industrial o pluvial que han sido procesadas en una planta de tratamiento. Posteriormente, estas aguas reciben un tratamiento adicional que las hace adecuadas para su reutilización, pasándose a denominar aguas regeneradas. Este tipo de aguas deben alcanzar unos mínimos de calidad, los cuales se establecen en el RD1620/2007 [7] y la propuesta de la Comisión Europea para los requerimientos mínimos para la reutilización de agua [8]. Los impactos del uso de aguas regeneradas para riego de olivar han sido considerados por varios autores, los cuales centran su atención en los impactos en el suelo [9, 10], en el desarrollo del árbol [11, 12] y en la calidad del aceite [12, 13], concluyendo que el uso de estas aguas, siempre que se haga de manera controlada y se realicen los correspondientes análisis de forma regular, no afecta a ninguno de los parámetros evaluados.

Por otro lado, diferentes autores han desarrollado aplicaciones enfocadas a la gestión del riego y la fertilización. Bueno-Delgado et al. [14] y Pagán et al. [15] propusieron herramientas que determinaban el tipo de fertilizante que debería aplicarse, desde un punto de vista económico, teniendo en cuenta la calidad del agua de riego. Sin embargo, en ambos trabajos era necesario conocer la solución nutritiva ideal, la cual el agricultor suele desconocer. Pérez-Castro et al. [16] desarrollaron una aplicación que determinaba la cantidad de fertilizante que se debe aplicar según el tipo de cultivo y las condiciones del sistema. Sin embargo, esta aplicación solo era válida para cultivos hortícolas de invernadero. Considerando la gestión del agua de riego, González Perea et al. [17] implementaron los principios del riego de precisión para el cultivo de la fresa en la aplicación *irrifresa*, lo que conllevó importantes ahorros de agua en el entorno de Doñana. Mérida García et al. [18] presentaron un modelo de gestión óptima de riego de olivar mediante energía solar que ajustaba el riego según las necesidades de riego del cultivo en tiempo real. Sin embargo, no existe ninguna herramienta que integre todos los elementos anteriormente citados: gestión del uso del agua y el fertilizante para el cultivo de olivar regado con aguas regeneradas. El objetivo de este trabajo, por tanto, es el desarrollo de una aplicación, de escritorio y para dispositivos móviles, destinada a agricultores y técnicos, para la programación en tiempo real del fertirriego de precisión del olivar regado con aguas regeneradas, que maximice la eficiencia en el uso del agua y del fertilizante.



El modelo desarrollado proporciona la cantidad de agua y fertilizante óptimos a aportar en tiempo real, ajustando estos valores a las necesidades reales del cultivo, asegurando así la sostenibilidad del sistema productivo. El modelo, denominado *FertigOlive*, se ha desarrollado en MATLAB™ [19] y está formado por cinco módulos relacionados (Figura 1): 1) características de la plantación, 2) datos climáticos, 3) volumen de agua mensual disponible, 4) programación del riego y 5) programación de la fertilización. Estos módulos se describen a continuación.

### 2.3.1. Características de la plantación

En este módulo se introducen los datos generales de la plantación tales como localización, dotación concedida, datos del cultivo (coeficiente de cultivo, ciclo productivo, etc.), características del suelo, estrategia de riego seleccionada, características del sistema de riego (caudal de gotero, separación goteros, etc.), estado nutritivo del árbol y calidad del agua de riego.

### 2.3.2. Datos climáticos

Este módulo contempla dos submódulos, ambos dependientes de la localización: predicción meteorológica y registros agroclimáticos históricos. En primer lugar, a partir de la localización, se determina la estación agroclimática más cercana según la Red de Estaciones Agroclimáticas de Andalucía. De esta estación, mediante técnicas de *web scraping* (extracción automática de información desde un sitio web) se obtienen todos los valores históricos disponibles de  $P$  y  $ET_0$  diarios, los cuales se almacenan en una base de datos relacional MySQL. Además, cada día, se actualiza dicha base de datos con los valores de  $P$  y  $ET_0$  del día anterior.

Así mismo, de forma diaria, se obtiene la predicción meteorológica de la zona para una semana mediante el uso de *AEMET OpenData*, la API REST (Application Programming Interface. REpresentational State Transfer) que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2015) pone a disposición de los usuarios. Los parámetros obtenidos son temperatura media, temperatura máxima ( $T_{max}$ ), temperatura mínima ( $T_{min}$ ), humedad relativa máxima ( $HR_{max}$ ), humedad relativa mínima ( $HR_{min}$ ), velocidad del viento ( $u_2$ ) e índice de nubosidad ( $nu$ ), los cuales mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith [21], se utilizan para obtener el valor de  $ET_0$ . Por último, se obtiene el valor de la predicción de la precipitación ( $P$ ) siguiendo la misma metodología. Toda esta información es la que se usa para la programación de los eventos de riego.

### 2.3.3. Agua mensual disponible

En este módulo se establecen los límites mensuales de cantidad de agua que se puede utilizar para riego, para ajustar la dotación concedida a las necesidades del olivo, de forma que se garantice la disponibilidad de agua en los momentos en los que el cultivo es más sensible al estrés hídrico. Esta limitación mensual se obtiene a partir de la concesión de uso de aguas regeneradas, de la estrategia de riego que se adopte y de las necesidades de riego históricas del olivo en la zona, calculadas a partir de los datos históricos de la estación agroclimática y de las características del cultivo. De forma quincenal, se comprueba si se ha consumido el agua inicialmente establecida. En caso contrario, se realiza una corrección y se vuelve a calcular el límite de agua para los meses restantes hasta terminar la campaña de riego, de forma que el agua no usada se pueda aplicar en dichos meses.

### 2.3.4. Programación del riego

La programación del riego se realiza considerando las necesidades de riego teóricas, el contenido de agua en el suelo, la estrategia de riego seleccionada, las características del sistema de riego y la limitación mensual al uso del agua. Las necesidades hídricas de riego se calculan, de forma diaria y a partir de las predicciones meteorológicas, como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y la precipitación efectiva ( $P_{ef}$ ) del día de riego. La  $P_{ef}$ , es

decir, el agua de lluvia almacenada en la zona radicular y la realmente aprovechable por el cultivo, se calcula aplicando un porcentaje fijo. Las necesidades de riego del cultivo se calculan para reponer la  $ET_c$  diaria, calculada por el método propuesto por la FAO [22] (Ec.(1)):

$$ET_c = ET_0 \cdot k_c \cdot k_r \quad (1)$$

donde  $ET_0$  se calcula con la predicción meteorológica (ver apartado 0),  $k_c$  es el coeficiente de cultivo para olivar, cuyos valores son los propuestos por Orgaz y Fereres [23] (Tabla 1) y  $k_r$  es el coeficiente de cobertura, el cual es igual a 1 para árboles con más del 60% de cubierta o toma valores entre 0 y 1 en caso contrario.

**Tabla 1.** Coeficiente de cultivo ( $k_c$ ) de olivar en la provincia de Córdoba

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50	0,55	0,60	0,60	0,65

En cuanto a la estrategia de riego utilizada, el modelo ofrece tres opciones al usuario: riego completo (RC), riego deficitario sostenido (RDS) y riego deficitario controlado (RDC). El RC programa el evento de riego cubriendo el total de las necesidades que tiene el cultivo. El RDS distribuye equitativamente un porcentaje de las necesidades a lo largo de la campaña de riego. Por último, la estrategia de RDC también aplica un porcentaje del total de las necesidades teóricas, pero en este caso, el porcentaje es variable a lo largo de la campaña. Esta variabilidad se debe a que esta estrategia se adapta al ciclo fenológico del cultivo, concentrando la mayor aplicación de agua en las fases en las que el olivo es más sensible al estrés hídrico, con el objetivo de minimizar los impactos en el desarrollo del árbol, rendimiento y calidad del aceite. Estos porcentajes se seleccionaron siguiendo los criterios establecidos por Rallo y Cuevas [24] y Orgaz *et al.* [25]. Para el caso particular de Andalucía, debido a los problemas asociados a la escasez de agua y a la extensión e importancia del cultivo de olivar, la estrategia recomendada es la de RDC [26, 27].

Además de las necesidades teóricas del cultivo y la estrategia de riego, para la programación de los eventos de riego, se tiene en cuenta el contenido de humedad en el suelo. Para ello, se determina el Balance de Agua en el Suelo (BAS) cuyo valor se reajusta semanalmente en el caso de disponer de sondas de humedad instaladas en campo, como es el caso de la finca de estudio. El BAS se calcula de forma diaria según la (2):

$$BAS_d = BAS_{d-1} + P_{eff,d} + I_{ap,d} - ET_{c,adj,d} - R_d - D_d \quad (2)$$

donde  $d$  es un índice relativo al día,  $BAS_{d-1}$  es el contenido de agua en el día anterior,  $I_{ap,d}$  el riego aplicado (mm),  $ET_{c,adj,d}$  la evapotranspiración del cultivo ajustada (mm),  $R_d$  la escorrentía (mm) y  $D_d$  la percolación profunda (mm).  $R_d$  y  $D_d$  son considerados nulos en este caso, ya que se trata de riego por goteo.

La  $ET_{c,adj}$  se relaciona con la dificultad del cultivo de extraer el agua en el caso de que el contenido de humedad en el suelo sea bajo. El valor de esta variable se calcula mediante la (3):

$$ET_{c,adj} = ET_c \cdot \frac{ATD - D_r}{ATD - AFA} \quad (3)$$

donde  $ATD$  es el agua total disponible del suelo (mm),  $D_r$ , el agotamiento en la zona radicular (mm), calculado como la diferencia entre  $ATD$  y  $BAS_{d-1}$ , y  $AFA$  es el agua fácilmente aprovechable en el suelo (mm).

Como salida, el modelo proporciona el tiempo de riego  $t$  (h) según la (4):

$$t = \frac{H_r \cdot A_s \cdot 10^4}{IE \cdot \sum_{i=1}^n q_e \cdot n_e} \quad (4)$$

donde  $H_r$  son los requerimientos de riego (mm),  $A_s$  es el área del sector (ha),  $IE$  la eficiencia de riego, que en este caso se considera 0,90,  $q_e$  el caudal del gotero (L/h) y  $n_e$  el número de goteros del sector. Se instaló una sonda de humedad en la finca para corregir periódicamente las estimaciones de humedad basadas en el balance hídrico.

### 2.3.5. Programación de la fertilización

La programación de la fertilización se fundamenta, en primer lugar, en el establecimiento de un plan anual basado en la evaluación del estado nutritivo del árbol. Esta evaluación se lleva a cabo mediante la realización de análisis foliares [28]. La toma de muestras se lleva a cabo en el mes de julio del año previo ya que es el momento en el que la concentración de los elementos en hoja es estable y es para el periodo para el cual están establecidos los niveles críticos de nutrientes en hoja [29] (Tabla 2). La comparación de los resultados obtenidos de los análisis foliares con dichos niveles críticos es lo que proporciona información sobre el exceso o carencia de nutrientes en el árbol. La aplicación de fertilizante solo se aplicará en el caso de que exista deficiencia de algún elemento ya que, tal y como demostraron Fernández-Escobar et al. [5], la aplicación de fertilizante en caso contrario puede ocasionar problemas de contaminación y pérdida económica sin aumentar la productividad. En segundo lugar, y de forma complementaria y opcional, la programación de la fertilización tiene en cuenta la evaluación de la cantidad de nutrientes presentes en el suelo para comprobar si esta es suficiente para cubrir las necesidades de fertilización del olivar y diagnosticar toxicidades [30].

Tabla 2. Interpretación de los niveles de nutrientes en hoja de olivo recogidas en julio, expresados en porcentaje de materia seca

Elemento	Deficiente	Adecuado	Tóxico
Nitrógeno (N) (%)	1,2	1,3 – 1,7	> 1,7
Fósforo (P) (%)	0,05	0,1 – 0,3	-
Potasio (K) (%)	0,4	> 0,8	-

En caso de detección de deficiencia en algún elemento, se establece la cantidad del nutriente a aportar en función de una estimación del consumo del árbol de dicho elemento [31]. Al año siguiente se vuelve a realizar el análisis foliar y se comprueba si es necesario aumentar o disminuir dicha dosis. En el caso del N, si su nivel en hoja es menor de 1,3% se aplican 0,5 kg/árbol de N, sin superar los 100 kg/ha. En el caso del K, cuando el valor sea inferior o igual a 0,7% en hoja, se aplicará 1 kg/árbol. Por último, en el caso del P, el valor inicial de aplicación será de 0,5 kg/árbol, en el caso de que su contenido en hoja sea inferior a 0,1%. La aplicación se hace en la fase central del riego ya que su eficacia es mayor y además evita que queden restos en los goteros a final de campaña.

Una vez establecido el plan anual de fertilización, es necesario considerar la calidad de agua aplicada, ya que, si se tiene en cuenta que los casos que aborda este trabajo son árboles regados con aguas regeneradas, es posible que se estén aportando algunos nutrientes a través del riego. La cantidad de fertilizante final a aportar será la diferencia entre la programada inicialmente en el plan anual y la cantidad de nutrientes presentes en el agua. Por último, la distribución de nutrientes se ajusta a la programación del riego realizada previamente y se ajusta la dosis de forma que la concentración de fertilizante nunca sea mayor a 0,7 l/m<sup>3</sup>.

### 2.4. Aplicación

El trabajo contempla la implementación del modelo descrito previamente en una aplicación de escritorio y para dispositivos móviles. En primer lugar, la aplicación de escritorio se ha

desarrollado en el entorno gráfico para desarrollo de interfaces que MATLAB™ pone a disposición de sus usuarios, App Designer, de la versión R2018a de MATLAB. Posteriormente, para hacer la aplicación independiente y disponible para todos los usuarios, se ha llevado a cabo la compilación de la aplicación por medio de MATLAB Compiler™ con MATLAB Runtime 9.4. En cuanto a la aplicación móvil, en la actualidad se encuentra en desarrollo en Android Studio 3.3.2, el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial de Google para el desarrollo de aplicaciones con Sistema Operativo Android, para nivel 21 de API mínimo, que abarca más del 90 % de los dispositivos Android actuales. Estas aplicaciones se han probado y calibrado con datos de la campaña 2018 y, con las mejoras introducidas, se usarán durante la campaña de riego de 2019 en la Comunidad de Regantes Tintín (Montilla).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Evaluación situación de partida

Los resultados relativos al análisis de suelo, a los análisis foliares y a los análisis de calidad de agua se observan en las Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5.

**Tabla 3.** Análisis de suelo realizados en septiembre de 2018 en la finca de estudio, localizada en la CR Tintín (Montilla)

Nombre muestra	Espesor (cm)	Textura			P (mg/Kg)	K (mg/Kg)
		Arcilla	Limo	Arena		
A1P1	0 – 15	37,8	26,7	35,3	14,1	563
A1P2	15 – 30	38,1	28,0	33,9	7,7	454
A2P1	0 – 15	33,8	23,3	42,0	9,9	454
A2P2	15 – 30	37,4	20,0	42,7	5,8	317
C1P1	0 – 15	37,0	28,0	34,4	23,6	872
C1P2	15 – 30	34,2	28,6	36,1	25,7	794
C2P1	0 – 15	32,0	23,4	43,5	22,8	978
C2P2	15 – 30	36,1	21,2	42,1	27,0	598

En primer lugar, del análisis de las texturas mediante el triángulo textural del USDA, se obtuvo que el suelo en todas sus muestras se corresponde con el tipo franco-arcilloso y mediante el modelo ROSETTA [32] se obtuvieron las curvas de retención de humedad del suelo. De estas curvas se determinó que el valor de capacidad de campo (CC) para el suelo es de 0.41 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> y el punto de marchitez permanente (PMP) de 0.20 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. Por último, en cuanto al contenido de macronutrientes, la cantidad de P en las calles es alta, mientras que en los árboles es menor, pero aun así se encuentra en un rango en el que es poco probable la respuesta al abonado, especialmente para el caso del olivo, ya que la importancia de este macronutriente es inferior que para otros cultivos anuales, debido a sus bajas extracciones y a su facilidad de reutilización [31]. Además, se ha demostrado que un alto contenido en fósforo (P) puede ocasionar bloqueos de Cinc en el suelo, pudiendo provocar deficiencias de este en el olivo. Por último, en cuanto al contenido de potasio (K) en el suelo, también se observan valores altos para todas las muestras, por lo que al igual que el caso del P, la respuesta al abonado es poco probable. Los niveles de nitrógeno (N) en suelo no se han analizado debido a la elevada movilidad a corto plazo de dicho elemento.

**Tabla 4.** Análisis foliares de olivar realizados en julio 2018 en la finca de estudio

Elemento	N (g/100g)	P (g/100g)	K (g/100g)
‘Hojiblanca’	2,02	0,11	0,92
‘Nevadillo azul’	1,35	0,13	0,88

Como se puede observar, los niveles de nutrientes en hoja en todos los casos se encuentran en el rango recomendado, excepto en el caso del N en la variedad ‘Hojiblanca’, que se encuentra en el rango de toxicidad. Numerosos estudios afirman que un exceso de nitrógeno en olivar puede ocasionar importantes perjuicios, tales como disminución de la calidad del aceite [33, 34], mayor sensibilidad a las heladas [35] o retraso en la maduración del fruto, lo que suele relacionarse con una disminución del rendimiento graso [36], además de problemas de contaminación en el suelo por lixiviación [5].

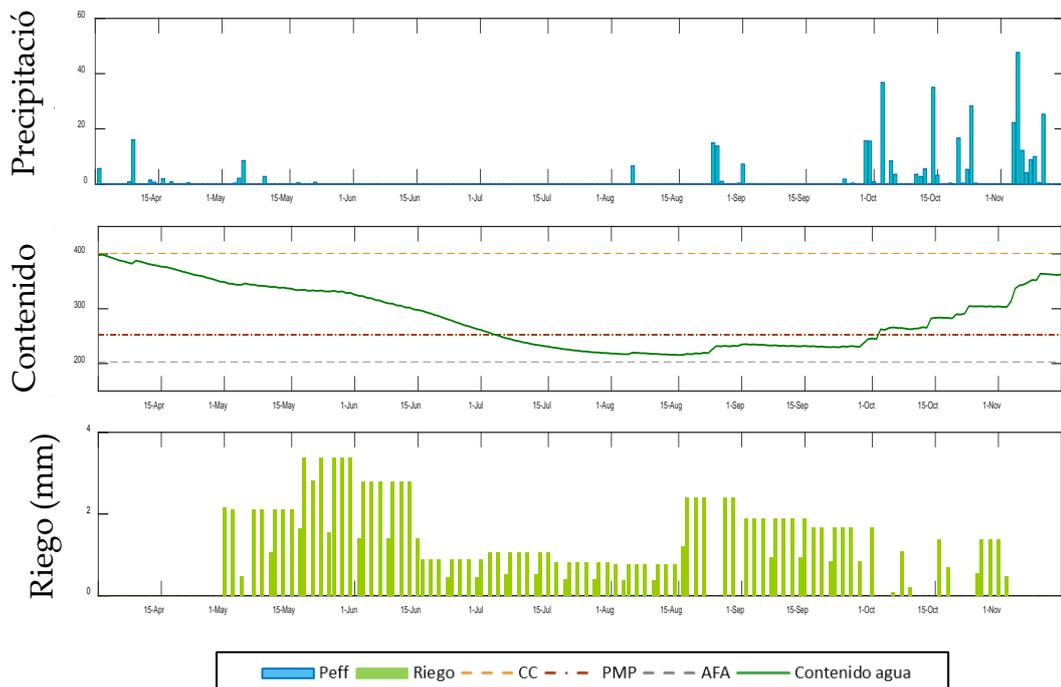
**Tabla 5.** Análisis de calidad del agua realizados en la finca de estudio

Fecha	pH	C.E. (µS/cm)	SST (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	E. coli (UFC/100ml)
21-ago-18	9	1,147	< 10	4,8	2	110
25-sep-18	8,2	1,421	< 10	4	1,4	90

Finalmente, en cuanto a la calidad del agua, se puede observar que el pH es también alcalino, lo cual es necesario considerar para la elección del tipo de fertilizante. La conductividad eléctrica no es elevada, por lo que el riesgo de salinidad se considera bajo (Troncoso et al., 2017). El resto de los parámetros se encuentran en el umbral establecido por la legislación.

### 3.2. Programación de fertirriego de precisión

La programación del fertirriego se ha aplicado a los datos disponibles de 2018, cuyos resultados se observan en la Figura 2. En esta figura, no hay información referente a la cantidad de fertilizante a aplicar en la campaña de riego debido a que, para el caso de estudio que se aborda, no es necesaria la aplicación adicional de ningún fertilizante, ya que el cultivo no presenta ninguna deficiencia nutricional y es suficiente con los nutrientes que ya de por sí incorporan las aguas regeneradas.

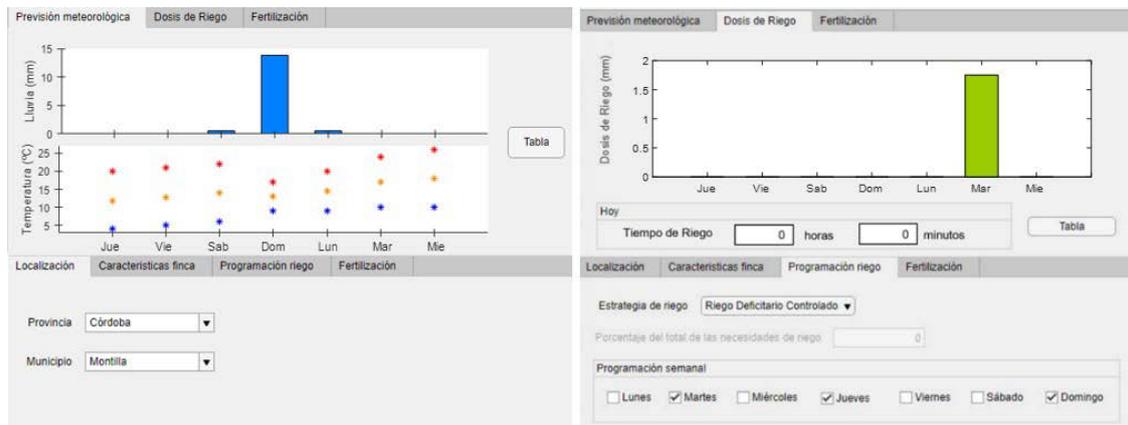


**Figura 2.** Distribución de la programación de riego propuesta, contenido de humedad en el suelo y precipitación efectiva a lo largo de la campaña de riego de 2018

El modelo ofrece una programación del riego que distribuye la dotación concedida aplicando un total de 1.490 m<sup>3</sup>/ha. Los momentos en los que se concentra el riego son mayo, junio y septiembre, momentos especialmente críticos al estrés hídrico [24, 38], concentrándose el déficit en los meses de verano. En agosto y hasta mediados de octubre, el contenido de agua en el suelo es inferior al contenido de agua fácilmente aprovechable, por lo que el cultivo tendrá mayor dificultad para extraer el agua del suelo.

### 3.3. Aplicación informática

El modelo se implementó en una aplicación informática. La Figura 3 muestra la interfaz gráfica de la versión para PC.



**Figura 3.** Interfaz gráfica de la aplicación de escritorio para la predicción de la programación para la semana del 28/03/2019 al 03/04/2019

En la aplicación informática el usuario debe introducir los datos mencionados anteriormente. Esto se realiza en la parte inferior de la interfaz, la cual se divide en cuatro pestañas: localización, características finca, programación riego y fertilización. En la parte superior aparecen gráficas de la predicción semanal de clima, riego y fertilización para la semana del 28/03/2019 al 03/04/2019. En este caso, pese a existir precipitación los días previos y debido a la escasez de agua en los meses anteriores, se recomendó realizar una aplicación de riego el martes 02/04. En cuanto a la fertilización, al no existir deficiencias nutricionales es recomendable no aplicar ningún fertilizante en esta campaña.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una aplicación de fácil manejo, *FertigOlive*, que permite la programación de un fertirriego de precisión empleando aguas regeneradas. *FertigOlive* se validó durante la campaña 2018 en una parcela de olivar mostrando que, gracias a los nutrientes incorporados en el agua de riego, no era necesaria ninguna aportación adicional de fertilizante, lo que conlleva una reducción tanto de los costes de producción como del impacto ambiental de la actividad.

La aplicación de *FertigOlive* muestra que el riego con aguas regeneradas es una alternativa sostenible y rentable para el riego de olivar en Andalucía, pues pone de manifiesto que el uso de este tipo de aguas permite el ahorro de fertilizante, lo que implica importantes beneficios económicos, ambientales y sociales.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Grupo Operativo REUTIVAR, proyecto de innovación cofinanciado por la Junta de Andalucía y la Unión Europea a través del FEADER 2014-2020, en el marco de las ayudas de la *Línea Olivar* para el funcionamiento de grupos operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícola.

## Referencias

1. INE, I.N. Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario 2018.
2. Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change* 2007, 81, 71-95.
3. Bisselink, B., Bernhard, J., Gelati, E., Adamovic, M., Guenther, S., Mentaschi, L., De Roo, A. *Impact of a changing climate, land use, and water usage on Europe's water resources: A model simulation study*, 2018, ISBN 9789279802874.
4. CHG - Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (Spanish Government) Plan Hidrológico de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021. 2016, 2015-2021.
5. Fernández-Escobar, R., Marin, L., Sánchez-Zamora, M.A., García-Novelo, J.M., Molina-Soria, C., Parra, M.A. Long-term effects of N fertilization on cropping and growth of olive trees and on N accumulation in soil profile. *Eur. J. Agron.* 2009, 31, 223-232.
6. Trinh, L.T., Vu, G.N.H., Van Der Steen, P., Lens, P.N.L. Climate Change Adaptation Indicators to Assess Wastewater Management and Reuse Options in the Mekong Delta, Vietnam. *Water Resour. Manag.* 2013, 27, 1175-1191.
7. Gobierno de España *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*, Spain, 2007,
8. European Commission *Proposal for a regulation of the european parliament and of the council on minimum requirements for water reuse*, 2018,
9. Petousi, I., Fountoulakis, M.S., Saru, M.L., Nikolaidis, N., Fletcher, L., Stentiford, E.I., Manios, T. Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (*Olea europaea* L. cv. 'Koroneiki') trees. *Agric. Water Manag.* 2015, 160, 33-40.
10. Segal, E., Dag, A., Ben-Gal, A., Zipori, I., Erel, R., Suryano, S., Yermiyahu, U. Olive orchard irrigation with reclaimed wastewater: Agronomic and environmental considerations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2011, 140, 454-461.
11. Ayoub, S., Al-Shdiefat, S., Rawashdeh, H., Bashabsheh, I. Utilization of reclaimed wastewater for olive irrigation: Effect on soil properties, tree growth, yield and oil content. *Agric. Water Manag.* 2016, 176, 163-169.
12. Bedbabis, S., Ferrara, G., Ben Rouina, B., Boukhris, M. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 2010, 126, 345-350.
13. Bourazanis, G., Roussos, P.A., Argyrokastritis, I., Kosmas, C., Kerkides, P. Evaluation of the use of treated municipal waste water on the yield, oil quality, free fatty acids' profile and nutrient levels in olive trees cv Koroneiki, in Greece. *Agric. Water Manag.* 2016, 163, 1-8.
14. Bueno-Delgado, M. V., Melenchon-Ibarra, A., Molina-Martinez, J.M. Software application for real-time ET<sub>o</sub>/ET<sub>c</sub> calculation through mobile devices. *Precis. Agric.* 2017, 18, 1024-1037.
15. Pagán, F.J., Ferrández-Villena, M., Fernández-Pacheco, D.G., Rosillo, J.J., Molina-Martínez, J.M. Optifer: An application to optimize fertiliser costs in fertigation. *Agric. Water Manag.* 2015, 151, 19-29.
16. Pérez-Castro, A., Sánchez-Molina, J.A., Castilla, M., Sánchez-Moreno, J., Moreno-Úbeda, J.C., Magán, J.J. cFertigUAL: A fertigation management app for greenhouse vegetable crops. *Agric. Water Manag.* 2017, 183, 186-193.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA  
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

17. González Perea, R., Fernández García, I., Martín Arroyo, M., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., Montesinos, P. Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. *Agric. Water Manag.* 2017, 183, 194-201.
18. Mérida García, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., Rodríguez Díaz, J.A. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J. Clean. Prod.* 2018, 175, 670-682.
19. Pratap, R. *Getting started with Matlab. A quick introduction for scientist and engineers*, Oxford University Press, Ed., 7th ed., 2017,
20. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) AEMET OpenData.
21. Allen, R.G. FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. *Irrig. Drain.* 1998, 300, 300.
22. Doorenbos, J., Pruitt, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. Drain.* 1977, 24.
23. Orgaz, F., Fereres, E. El Riego. En *El Cultivo del Olivo*, Junta de Andalucía, Ediciones Mundiprensa, Eds., Madrid, 2001, pp. 285-306.
24. Rallo, L., Cuevas, J. Fructificación y producción. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 145-186.
25. Orgaz, F., Fereres, E., Testi, L. El Riego. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 461-490.
26. Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2003, 128, 425-431.
27. Padilla-Díaz, C.M., Rodríguez-Dominguez, C.M., Hernandez-Santana, V., Perez-Martin, A., Fernández, J.E. Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agric. Water Manag.* 2016, 164, 28-37.
28. Fernández-Escobar, R., Parra, M.A., Navarro, C., Arquero, O. Foliar diagnosis as a guide to olive fertilization. *Spanish J. Agric. Res.* 2009, 7, 212-223.
29. Fernández-Escobar, R. Trends in olive nutrition. *Acta Hortic.* 2018, 1199, 215-223.
30. Parra, M.A. Suelo. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 251-287.
31. Fernández-Escobar, R. Fertilización. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 419-460.
32. Schaap, M.G. ROSETTA model. *J. Hydrol.* 1999, 251, 0-3.
33. Erel, R., Kerem, Z., Ben-Gal, A., Dag, A., Schwartz, A., Zipori, I., Basheer, L., Yermiyahu, U. Olive (*Olea europaea* L.) tree nitrogen status is a key factor for olive oil quality. *J. Agric. Food Chem.* 2013, 61, 11261-11272.
34. Fernández-Escobar, R., Beltrán, G., Sánchez-Zamora, M.A., García-Novelo, J., Aguilera, M.P., Uceda, M. Olive oil quality decreases with nitrogen over-fertilization. *HortScience* 2006, 41, 215-219.
35. Fernández-Escobar, R., Navarro, S., Melgar, J.C. Effect of Nitrogen Status on Frost Tolerance of Olive Trees. *Acta Hortic.* 2011, 41-45.
36. Fernández-Escobar, R., Antonaya-Baena, M.F., Sánchez-Zamora, M.A., Molina-Soria, C. The amount of nitrogen applied and nutritional status of olive plants affect nitrogen uptake efficiency. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 2014, 167, 1-4.
37. Troncoso, A., Magán, J.J., Cantos, M., Liñan, J., Fernández, J.E. Fertirrigación. En *El Cultivo del Olivo*, 2017, pp. 491-517.
38. García, J.M., Cuevas, M. V., Fernández, J.E. Production and oil quality in «Arbequina» olive (*Olea europaea*, L.) trees under two deficit irrigation strategies. *Irrig. Sci.* 2013, 31, 359-370.