

## PERSPECTIVAS DEL USO DE AGUAS DE PROCESADO DE LA INDUSTRIA DE ACEITUNA DE MESA PARA RIEGO POR GOTEO EN OLIVAR: AVANCE DE RESULTADOS

B. Cuadrado-Alarcón<sup>1</sup>, A. Peña<sup>1</sup>, P. Reina<sup>2</sup>, J.V. Giráldez<sup>3,4</sup>, T. Vanwalleghem<sup>4</sup>, y A.M. Laguna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: [g82cualb@uco.es](mailto:g82cualb@uco.es)

<sup>2</sup>Depto. de Física Aplicada, Universidad de Córdoba, Edif. A. Einstein, Cra Madrid km 390, 14071 Córdoba. e-mail: [g52regap@uco.es](mailto:g52regap@uco.es)

<sup>3</sup>Depto. de Agronomía, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba

<sup>4</sup>Depto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: [ag1gicej@uco.es](mailto:ag1gicej@uco.es)

**RESUMEN.** La industria del cocido de aceituna de mesa genera un volumen apreciable de aguas residuales, con grandes cantidades de cloruro sódico e hidróxido de sodio. Además, el agua constituye el principal factor limitante en la producción agrícola de la zona, por ello se planteó su reutilización como recurso. Se diseñaron ensayos de campo en la Campiña Suroeste Sevillana, consistentes en riego por goteo de olivares de verdeo con diferentes diluciones de agua residual y dulce.

Los resultados muestran un aumento en la producción de aceituna, respecto los testigos. La conductividad eléctrica de la solución del suelo incrementó desde un intervalo 1-3 dS m<sup>-1</sup> al comienzo, hasta otro de 3-13 dS m<sup>-1</sup> al final del periodo de riego. Tras la infiltración del agua de las primeras lluvias otoñales, sufrió un incremento debido a la disolución de las costras salinas, reduciéndose con las lluvias invernales a valores por debajo de 6 dS m<sup>-1</sup>.

**ABSTRACT.** The olive-fruit processing industry generates an appreciable volume of wastewater containing sodium chloride and sodium hydroxide among other solutes. Due to the scarce and seasonally distributed rainfall in the area, water constitutes the main limiting factor for agricultural production. Field trials were installed within a project in the southwestern Sevillian Campiña, to recover water as a resource, and to reduce contaminants. A mixture of wastewater and freshwater was applied to rainfed olive-fruit orchards.

Yield of olive-fruit in treated trees was found higher than in those without treatment. During the first campaign solute concentration rose from an initial electrical conductivity of 1-3 dS m<sup>-1</sup> to a range of 3-13 dS m<sup>-1</sup> at the end of the irrigation period. Precipitated salts surrounding the drippers were dissolved by Autumn rains, showing an increase in the electrical conductivity, lowering later by the leaching of the winter rains to levels under 6 dS m<sup>-1</sup>.

### 1.- Introducción

El sector de la aceituna de mesa ocupa una superficie de 0.155 Mha, con una producción media anual de 596 Gg de aceituna. España es el país con mayor producción del sector, con un 21% de la producción mundial anual (2012-2016). El 80% de la producción de España se ubica en

Andalucía (MAGRAMA, 2016).

La industria genera un volumen considerable de aguas residuales. Solo en España, se ha estimado un volumen de al menos 0.894 hm<sup>3</sup> anuales. Estas aguas residuales, principalmente salmueras y aguas de cocido de aceituna, se almacenan en balsas de evaporación, incrementando su salinidad cada año y suponiendo un riesgo importante de contaminación por posibles desbordamientos o roturas. La figura 1 muestra unas balsas en la zona de estudio.



**Fig. 1.** Balsas de evaporación de aguas residuales de la industria de aderezo de aceituna de mesa de 24 ha ubicadas en la provincia de Sevilla (Google Earth, 2016).

Potencialmente, esta agua podría ser usada para el riego del olivar en zonas que actualmente se encuentren en secano (e.g. Oster, 1994). Dicha práctica podría aumentar la productividad del olivar (Oster y Wichelns, 2003), dado que las industrias se encuentran generalmente en regiones con precipitaciones estacionales en otoño a invierno, y veranos largos, secos y calurosos.

Este trabajo plantea la posibilidad de aprovechar el agua residual para el riego del olivar. Este posible uso alternativo del agua tendría como fin aprovechar el recurso y eliminar un contaminante puesto que el agua



**Fig. 2.** Ubicación en el plano de las 8 parcelas experimentales. F1, F2, F3 y F4 pertenecen al T.M. de Arahal, F5, F6 y F7 al T.M. de La Puebla de Cazalla, y F8 al T.M. de La Lantejuela (Google Earth, 2016).

de las balsas no se evapora fácilmente y puede provocar problemas de desbordamiento en el caso de chubascos intensos. El olivo es una planta relativamente tolerante a la salinidad (Melgar et al., 2009) que controla de forma eficaz la transpiración del agua a través de sus estomas. El uso de esta agua de menor calidad (Rhoades et al., 1992), implica la necesidad de evacuar el exceso de sales con la lluvia otoñal e invernal (e.g. Corwin et al. 2007, Letey et al., 2011).

Por ello se iniciaron unos ensayos de aplicación de riego por goteo con diferentes diluciones de agua residual de plantas de entamado en agua dulce cuyos son: (i) aliviar al olivo durante el estiaje para aumentar la producción y la calidad de la aceituna de mesa, (ii) controlar la acumulación de solutos en la solución del suelo, y (iii) reducir el riesgo de contaminación del agua consumiendo al menos parte del volumen de agua residual.

## 2.- Materiales y métodos

En junio de 2018 se instalaron 8 parcelas experimentales, en el marco de un Grupo Operativo en la Campiña suroccidental sevillana. Cada una de las parcelas dispone de un sistema de riego por goteo para 8 olivos, a los que se aportaron concentraciones salinas variables en el tiempo, pero idénticas para cada uno de los olivos dentro de una parcela experimental. En la figura 2 se muestran las localizaciones de las 8 parcelas experimentales.

### 2.1.- Descripción de los ensayos

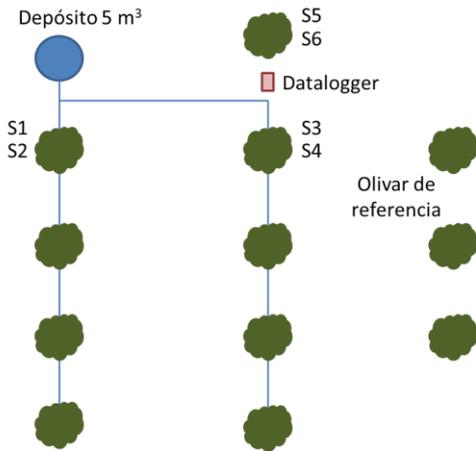
Las características de las parcelas seleccionadas, tabla 1, son diferentes en cada caso, la variedad más común para su uso como aceituna de mesa es manzanilla. Los suelos seleccionados son principalmente arcillosos, representativos de la zona, habiéndose seleccionado también un suelo franco arcilloso y otro arenoso franco.

**Tabla 1.** Características de las fincas

	Marco (m)	Diámetro de copa (m)	Variedad	Clase textural del suelo
F1	10 x 12	7	Manzanilla	Franco arcilloso
F2	10 x 10	4	Manzanilla	Arcilloso
F3	10 x 10	4,5	Gordal	Arenoso franco
F4	10 x 10	5,5	Manzanilla	Arcilloso
F5	7 x 7	4	Manzanilla	Arcilloso
F6	8 x 4	3	Manzanilla	Arcilloso
F7	7,5 x 7,5	3,5	Manzanilla	Arcilloso
F8	8 x 8	4	Manzanilla	Arcilloso

Las parcelas experimentales constan de un sistema de riego y una red de sensores, como se presenta en el esquema de la figura 3, en el que se puede observar el sistema de riego para ocho árboles, rodeados del olivar de referencia en secano.

El sistema de riego por goteo dispone de un depósito de 5 m<sup>3</sup>, que se recarga periódicamente con diluciones de agua residual. El sistema de impulsión para el riego se alimenta con la energía recogida por una placa solar, y almacenada en una batería. La red de riego está compuesta por una tubería con góteros integrados autocompensantes con un caudal de 2,2 L h<sup>-1</sup> por



**Fig. 3.** Esquema de una parcela experimental. Sistema de riego representado en azul, sistema de medidas representado por los sensores S1 a S6 y el datalogger.



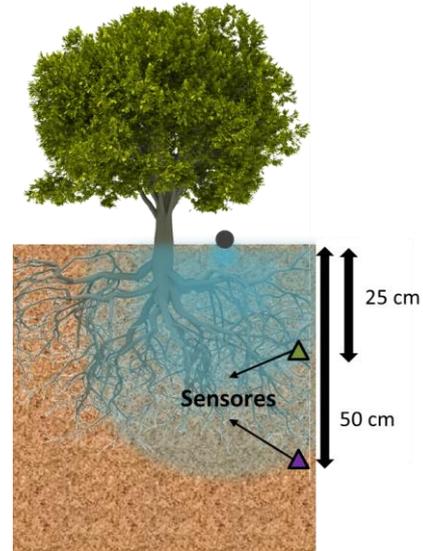
**Fig. 4.** Fotografía de la instalación para el riego de uno de los ensayos

gotero, y una separación de 1 m entre goteros.

## 2.2.- Instalación de sensores y recogida automática de los datos

Se ha dispuesto un conjunto de sensores instalados en dos profundidades del perfil del suelo, figura 5, para medir de forma continua la conductividad eléctrica del suelo (CE), la humedad, y la temperatura en 3 árboles por ensayo, con sensores Decagon GS3 cuyos datos se recogen cada 30' en un registrador Em60G. El conjunto de bomba y sensores está alimentado con una placa solar como se expone en la figura 4.

Paralelamente se está muestreando el suelo en el campo de forma periódica, incluyendo muestras de fruto en la recolección, y agua de riego. Posteriormente se analizan las



**Fig. 5.** Posición de sensores en el suelo bajo un olivo.

muestras en el laboratorio para estimar la humedad gravimétrica, la conductividad eléctrica del extracto 1:5 del suelo, la conductividad eléctrica del agua de riego (Corwin y Yemoto 2017), y el peso y tamaño del fruto con una balanza y un pie de rey.

Mediante el plan de muestreo establecido se determina también el agua residual en las industrias y las diluciones que se aplican al riego, controlando la salinidad y pH del agua utilizada durante la campaña.

## 2.3.- Modelo sencillo para interpretar la evolución de la humedad y la concentración de sales

La evolución de humedad y concentración de solutos en el suelo puede ser aproximada con ayuda de sendos balances de agua y sales a escala diaria (Reina, 2019). Para ello se puede reducir la complejidad de los procesos admitiendo un flujo unidimensional en torno al gotero y su bulbo (Han et al., 2007). Phogat et al. (2012, 2014), entre otros, han mostrado el carácter multidimensional del flujo de agua y solutos, pero es posible apreciar su comportamiento aún a una escala reducida. Se supone que el suelo se compone de dos horizontes para aprovechar la información suministrada por los dos sensores instalados.

El balance de la masa de agua se basa en las aportaciones de la lluvia,  $p_i$ , y del riego,  $r_i$ , así como de las pérdidas por escorrentía superficial,  $q_i$ , evapotranspiración,  $e_i$ , y percolación profunda,  $l_i$ . El balance se completa con la variación del volumen de agua en el perfil del suelo por unidad de superficie.

$$\Delta w_i = w_i - w_{i-1}$$

$$\Delta w_i = p_i + r_i - (q_i + e_i + l_i) \quad (1)$$

Usando los datos disponibles, precipitación y dosis de riego diarias, se complementa la información con (i) la estimación de la infiltración del agua de lluvia usando el modelo de Green y Ampt (e.g. Mein y Larson, 1973) adaptada a medios estratificados siguiendo a Moore (1981). El exceso de lluvia se convierte en el volumen de escorrentía,  $q_i$ , mientras que la percolación que va desde el primer horizonte al segundo,  $l_{i,1}$ , y la que sale de este último hacia horizontes más profundos,  $l_{i,2}$ , se obtienen como resultados de este modelo.

La intensidad de evapotranspiración,  $e_i$ , se estima a partir de las condiciones atmosféricas, la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith calculada y disponible en la red RIA de información agroclimática (IFAPA, 2019). Este valor máximo que corresponde a la primera etapa de la evaporación de control atmosférico se corrige en la segunda etapa de control edáfico con la ecuación sugerida por Philip (1957) y formulada por Ritchie (1972).

El balance de la masa de solutos se basa en la aportación externa, en el agua de riego, despreciando la concentración de la lluvia en comparación con la del agua de riego,  $c_{ri}$ , por tanto,  $r_i c_{ri}$ , la pérdida en el agua de percolación,  $l_{i-1} c_{i-1,1}$ , y considerando la masa de solutos que permanece en el horizonte,  $w_{i-1,1} c_{i-1}$ , (e.g. van der Zee et al., 2010). La concentración resultante en el día  $i$  es  $c_{i,1}$

$$c_{i,1} = \frac{w_{i-1,1}c_{i-1,1} + r_i c_{ri} - l_i c_{i-1,1}}{w_{i,1}} \quad (2)$$

En el segundo horizonte se procede de forma similar al primero, con la aportación debida a la percolación del horizonte superior,  $l_{i-1,1} c_{i-1,1}$ , la pérdida por análogo concepto hacia horizontes profundos,  $l_{i-1,2} c_{i-1,2}$ , y contemplándose la masa que se mantiene en el horizonte,  $w_{i-1,2} c_{i-1,2}$ . La concentración nueva de solutos en este horizonte es  $c_{i,2}$ .

$$c_{i,2} = \frac{w_{i-1,2}c_{i-1,2} + l_{i-1,1}c_{i-1,1} - l_{i-1,2}c_{i-1,2}}{w_{i,2}} \quad (3)$$

El modelo se resuelve numéricamente por un código sencillo pues las tres ecuaciones son explícitas y el modelo de Green y Ampt se resuelve por un método sencillo de búsqueda de raíces en una ecuación no lineal (e.g. Press et al. 1992, Cap. 9). Los datos usados en el modelo se han estimado con las funciones de edafotransferencia de Rawls et al. (1983). La bondad del ajuste de los datos calculados y medidos con los sensores se puede estimar con el índice de Nash y Sutcliffe (e.g. Ritter y Muñoz Capena, 2013). Se ha adoptado aquí la equivalencia aproximada entre la conductividad eléctrica y la concentración de solutos de Richards (1954).

### 3.- Resultados y discusión

En los primeros análisis del agua de las balsas, se observó una concentración de solutos muy elevada debida al predominio de la evaporación sobre la precipitación en el balance anual, con conductividades eléctricas en torno a  $100 \text{ dS m}^{-1}$ .

Se separó el agua residual a la salida de las industrias, que, aun siendo salmueras, contienen salinidades más bajas que las balsas de evaporación. Se han aplicado diluciones como agua de riego con conductividades eléctricas variando entre  $5\text{-}13 \text{ dS m}^{-1}$  durante el verano y el otoño de 2018.

Las precipitaciones en la zona de estudio se concentraron en el mes de octubre, cuando la intensidad de la evapotranspiración era aún elevada, por lo que no se produjo el lixiviado de sales esperado con las lluvias otoñales.

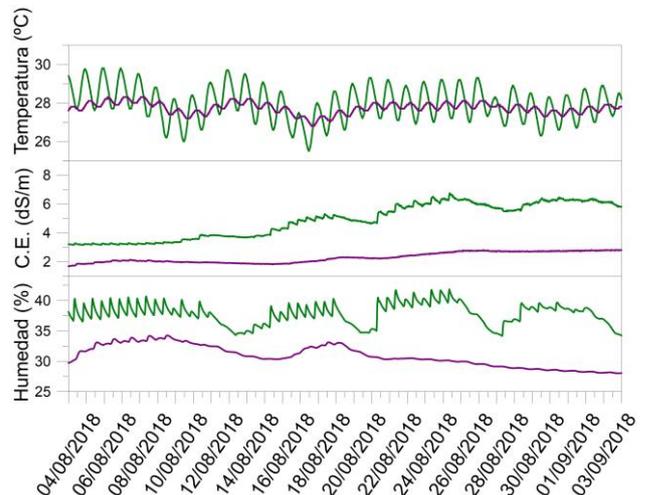


Fig. 6. Datos que recogen los sensores bajo cada árbol. En verde se presentan los datos suministrados por el sensor más somero, a 25 cm de la superficie. En morado, los datos obtenidos por el sensor ubicado a 50 cm de la superficie.

La figura 6 muestra las características de los datos recogidos en la red de sensores dispuesta en el suelo. Los datos de temperatura, humedad, y conductividad eléctrica aparente a dos profundidades, 25 y 50 cm, se capturan cada 30 minutos. El sistema radical del olivo es bastante somero. Se ha estimado una profundidad media de las raíces de 25 cm, y así es posible observar el comportamiento del suelo hacia un horizonte algo más profundo. Los datos de humedad muestran los pulsos de riego diarios, con corte del riego durante sábados y domingos. La conductividad eléctrica aparente, muestra una respuesta inmediata, aumentando al comienzo del riego con aguas salinas, comienzo de agosto.

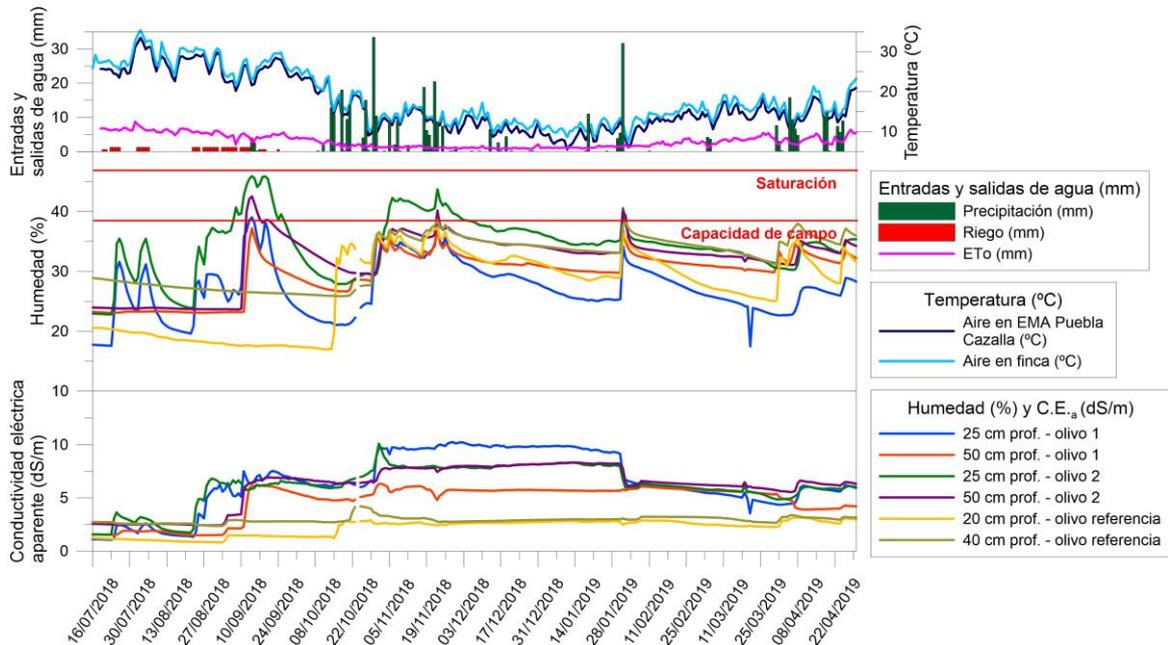


Fig. 7. Media diaria de los datos medidos por los sensores en una parcela experimental desde el comienzo del proyecto. F5.

En los datos obtenidos por los sensores se observa un incremento de la conductividad eléctrica aparente en todas las parcelas, que comienza con  $1-3 \text{ dS m}^{-1}$  y finaliza el periodo de riego con valores entre  $3-13 \text{ dS m}^{-1}$ . Tras el periodo lluvioso, la C.E.a ha disminuido en todas las parcelas experimentales llegando a valores máximos de torno a  $6 \text{ dS m}^{-1}$ . En la figura 7 se presenta la media diaria de los datos de una de las parcelas, F5, desde el comienzo del ensayo. En dicha figura se detecta la relación entre las primeras precipitaciones y el aumento de la conductividad, y la posterior disminución con las precipitaciones a partir de enero. Dichas tendencias se presentan en los 8 ensayos.

El aumento de la conductividad eléctrica del suelo tras la caída de las primeras lluvias otoñales es probablemente debido a la disolución de algunas sales precipitadas en la superficie del suelo que son lixiviadas hacia su interior.

Los análisis de laboratorio muestran tendencias similares a las observadas por la red de sensores. En la tabla 2 se presenta la superficie de los ensayos, el volumen total de riego aplicado durante la campaña, su conductividad media, y la conductividad eléctrica del extracto 1:5 del suelo en profundidades de 0-10 cm en tres momentos: antes del comienzo del riego, 01/07/2018, al terminar la campaña de riego, 09/10/2018, y tras las primeras lluvias invernales 12/12/2018.

La conductividad eléctrica en el extracto 1:5 aumenta considerablemente al final de la campaña de riego, para luego disminuir a valores parecidos a los del estado inicial, corroborando así las tendencias observadas por los sensores. A pesar de estas observaciones, aún es necesaria una comparación más exhaustiva de los datos de los sensores

Tabla 2. Resultados de análisis en laboratorio. Superficie de la parcela de ensayo, volumen total de agua de riego aplicada durante la campaña, conductividad eléctrica media del agua de riego aplicada, y conductividad eléctrica del extracto 1:5 del suelo en profundidades de 0-10 cm en los días indicados. Datos de 2018.

	Sup (m <sup>2</sup> )	Agua aplicada (m <sup>3</sup> )	C.E. riego	C.E.-1:5 suelo (dS/m)		
				01/07	09/10	12/12
F1	120	32	8,175	0,155	0,870	0,265
F2	100	31	8,200	0,324	0,339	0,219
F3	100	41	9,267	0,250	1,370	0,091
F4	100	30	8,375	0,276	1,570	0,133
F5	49	15	8,300	0,170	0,930	0,187
F6	32	26	6,125	0,219	1,100	0,171
F7	37,5	15	6,833	0,219	0,710	0,125
F8	64	24	7,375	0,171	2,070	0,169

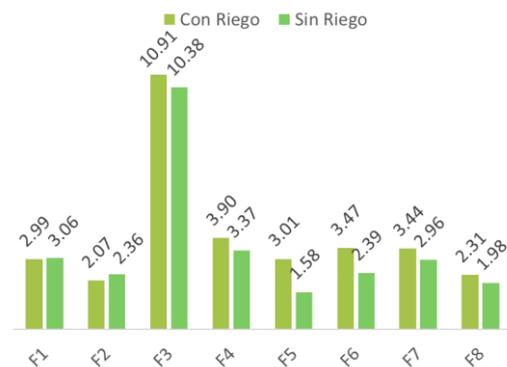


Fig. 8. Valores medios de peso, g, de 10 frutos por muestra. La variedad de aceituna es gordal en F3 y en el resto de los ensayos manzanilla.

con los datos de laboratorio, y a diferentes profundidades en el perfil del suelo.

Las medidas de fruto en octubre 2018 muestran como el árbol responde al riego con un incremento del tamaño y peso de la aceituna: incremento del 22% en peso, 3% largo y 5% ancho de aceituna. La figura 8 expone los pesos medios para muestras de cada ensayo, de los árboles sometidos al riego salino, respecto al olivar de referencia en secano. En el caso de las parcelas F1 y F2, se produjeron roturas del sistema de riego por roedores, por lo que la distribución del riego fue irregular, y se cortó el riego antes que en el resto de los ensayos. Esta podría ser la causa de la ausencia de beneficios en el peso medio del fruto en F1 y F2, con respecto al del olivar de referencia.

El modelo aplicado para interpretar la evolución de la humedad y la concentración de solutos ha sido aplicado a los datos del ensayo F5. La humedad del suelo que aparece en las figuras 9 y 10, primer y segundo horizonte, respectivamente, fluctúa con los aportes de riego y lluvia, y las pérdidas, especialmente de la evapotranspiración, tanto en el verano como en el otoño e invierno. Las lluvias otoñales se han reducido en 2018 a un mes, octubre, lo que ha menguado la infiltración y la percolación del agua hacia horizontes del suelo más profundos.

La figura 11 expone la evolución de la masa de solutos en suelo por unidad de superficie comparada con los resultados del modelo de Reina (2019). En la fase de desarrollo actual del modelo no se considera la disolución

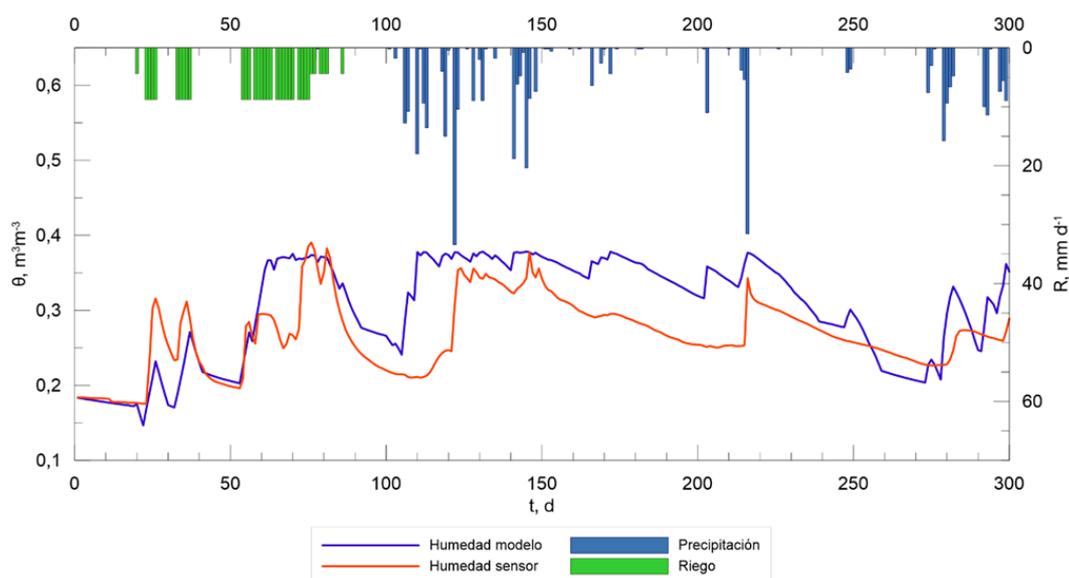


Fig. 9. Humedad media calculada entre 0 y 0,375 m de profundidad, respecto a la medida por el sensor ubicado a 0,250 m. Inicio de la simulación el día 1 de julio de 2018 (día 0). Resultados del modelo de Reina (2019).

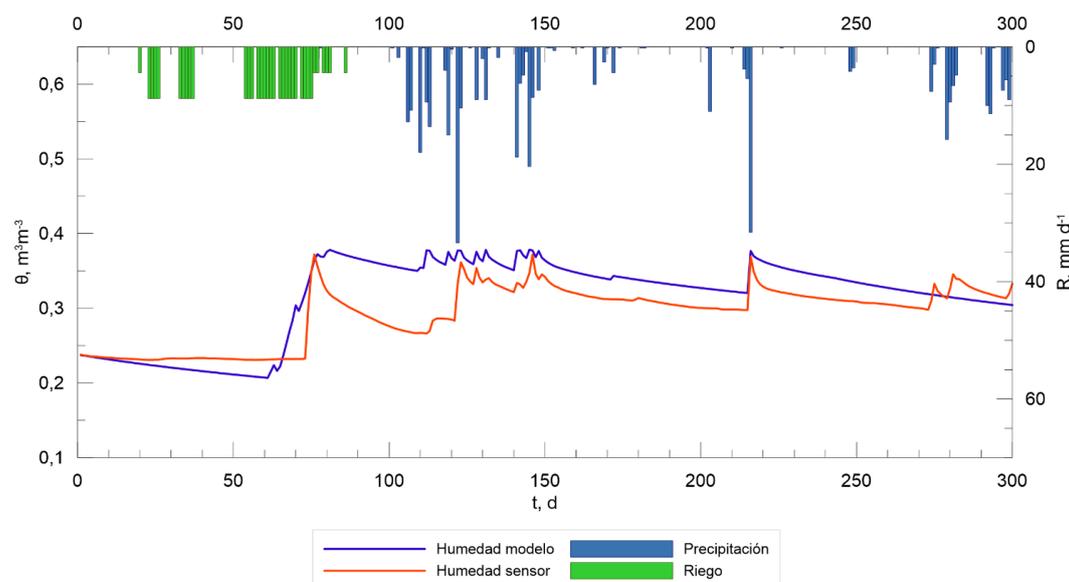
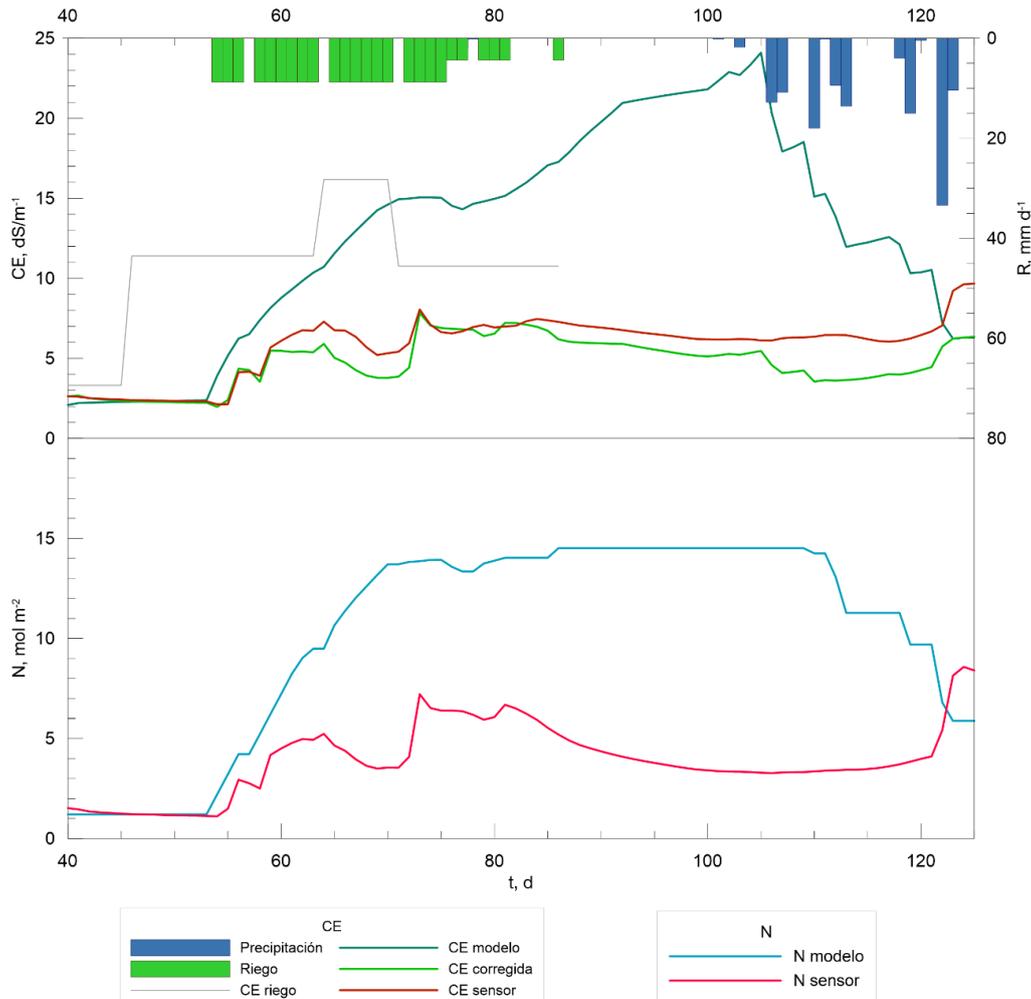


Fig. 10. Humedad media calculada entre 0,375 y 0,875 m de profundidad, respecto a la medida por el sensor ubicado a 0,500 m. Inicio de la simulación el 1 de julio de 2018 (día 0). Resultados del modelo de Reina (2019).



**Fig. 11.** Evolución de la conductividad eléctrica aparente (gráfico superior) y de la densidad de solutos, en  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$  (gráfico inferior) en entre 0 y 0,375 m de profundidad entre los días 40 y 120. Inicio de la simulación el 1 de julio de 2018 (día 0). Resultados del modelo de Reina (2019).

de las sales precipitadas en la superficie del suelo, por lo que se ha efectuado una corrección consistente en la diferencia detectada entre la masa de sales aportada, mediante los valores calculados según salinidad del riego para los primeros 0,375 m de profundidad, y la masa de sales percolada, mediante los valores obtenidos diariamente por el sensor ubicado a 0,5 m de profundidad, determinando las sales precipitadas en los primeros centímetros del suelo. Este valor de sales precipitadas diario se ha restado a los resultados del modelo, obteniendo una curva de CE similar a la medida por el sensor. Los resultados muestran una tendencia parecida a la observada por Phogat et al. (2018), aunque en diferentes condiciones.

Sin embargo, se está modificando el modelo para incluir una representación más precisa del proceso de disolución de sales superficiales por el agua de lluvia que se infiltra en el suelo. Es también necesario considerar la dispersión de solutos en el flujo lateral del agua, e incluso la influencia de las irregularidades de la superficie, en el caso del agua de lluvia como, por ejemplo, sugieren Appels et al. (2016).

#### 4.- Conclusiones

La concentración de solutos en la superficie del suelo en primer lugar aumenta con la lluvia, probablemente debido a la disolución de solutos, y después comienza a reducirse con el lixiviado de los chubascos invernales. La humedad del suelo aumenta con el riego, por lo que el potencial de agua aumenta, lo que mitiga el posible efecto de la concentración de solutos en su solución.

El árbol ha respondido al riego con un incremento del tamaño y peso de la aceituna: 22% en peso, 3% largo y 5% ancho de aceituna. Y los análisis foliares no muestran cambios desde el comienzo del proyecto, el árbol parece estar aceptando bien las altas salinidades.

Aunque la concentración salina en las parcelas experimentales es aún alta, ha disminuido con los últimos chubascos, en un año especialmente seco.

La irregularidad en la meteorología anual, con una primavera bastante lluviosa, un verano normal, un mes de

octubre muy lluvioso y el resto del otoño y el invierno muy secos, impide generalizar los resultados. Es necesario recoger más datos, en un año con precipitaciones regulares, para caracterizar el movimiento de solutos en el suelo. Se seguirán recogiendo datos durante 2019-2020.

El agua utilizada en la industria no tiene la misma concentración de solutos a lo largo del año, es conveniente separar el agua residual en varios tipos, ya que las aguas de lavado de las industrias tienen menor concentración de solutos que las salmueras y otros tipos. Una separación previa permitiría un mejor aprovechamiento para el riego de apoyo.

*Agradecimientos.* Proyecto financiado por la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía (España), Cofinanciado con fondos FEADER [Proyecto GOP3I-SE-16-0002]. Acrónimo del proyecto: H2OliveTree (<http://www.h2olivetree.es/>).

## 7.- Bibliografía

- Appels, W.M., P.W. Bogaart, y S.E.A.T.M. van der Zee, 2016. Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity. *J. Hydrol.* 534, 493-504.
- Corwin, D.L., J.D. Rhoades, y J. Šimůnek, 2007. Leaching requirement for soil salinity control: steady-state versus transient models. *Agric. Water Manag.* 65, 165–180.
- Corwin, D.L., y K. Yemoto, 2017. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. en *Methods of Soil Analysis*, Vol. 2, doi:10.2136/mta2015.0039.
- Google Earth Pro, 2006. T.T.M.M. Arahál, Puebla de Cazalla y Lantejuela, 30 S 288349,88 E y 4118468,80 N, elevación 214M. Ortofotografía, accedido el 18 de julio de 2019. <<http://www.google.com/earth/index.html>>.
- IFAPA. Estaciones agroclimáticas. Provincia de Sevilla.. [https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?action=Static&url=listadoEstaciones.jsp&c\\_provincia=41](https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?action=Static&url=listadoEstaciones.jsp&c_provincia=41) [consulta: 18 julio 2019]
- Letey, J., G.J. Hoffman, J.W. Hopmans, S.R. Grattan, D. Suarez, D.L. Corwin, J.D. Oster, L. Wua, y C. Amrhein, 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agric. Water Manag.* 98, 502–506
- Hao, A., A. Marui, T. Haraguchi, y Y. Nakano, 2007. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 52, 187–193.
- MAGRAMA, 2016. Diagnóstico sobre el sector de la aceituna de mesa en España, *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente*.
- Mein, R.G., y C.L. Larson, 1973. Modeling infiltration during steady rain. *Water Resour. Res.* 9, 384–394.
- Melgar, J.C., Y. Mohamed, N. Serrano, P.A. García-Galavís, C. Navarro, M.A. Parra, M. Benlloch, y R. Fernández-Escobar, 2009. Long term responses of olive trees to salinity. *Agric. Water Manag.* 96, 1105-1113.
- Moore, I. D., 1981. Infiltration equation modified by surface effects. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* 107, 71-86.
- Oster, J. D., 1994. Irrigation with poor quality water. *Agric. Water Manag.* 25, 271-297.
- Oster, J. D., y D. Wichelns, 2003. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. *Irrig. Sci.* 22, 107-120.
- Pastor, M., y F. Orgaz, F., 1994. Los programas de recorte de riego en olivar. *Agricultura*, 746, 768-776.
- Philip, J.R., 1957. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *J. Meteor.* 14, 354–366.
- Phogat, V., M. Mahadevan, M. Skewes, y J.W. Cox, 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrig. Sci.* 30, 315–333.
- Phogat, V., M.A. Skewes, J.W. Cox, G. Sanderson, J. Alam, y J., Šimůnek, 2014. Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *J. Hydrol.* 513, 504-516.
- Phogat, V., T. Pitt, J.W. Cox, J. Šimůnek, M.A. Skewes, 2018. Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages. *Agric. Water Manage.* 201, 70-82.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, y B.P. Flannery, 1992. *Numerical recipes*. 2ª ed. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, y N. Miller, 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydr. Eng. ASCE* 109, 62–70.
- Reina, P., 2019. *Descripción de la respuesta de un suelo de olivar al riego localizado con agua salobre*. Trabajo final de grado. Depto. de Física Aplicada. Universidad de Córdoba.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agr. Hbk. 60.
- Ritchie, J.T., 1972. Model [or predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8, 1204-1213.
- Ritter, A., y R. Muñoz-Carpena, 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *J. Hydrol.* 480, 33–45.
- Rhoades, J.D., A. Kandiah, y A.M. Mashali, 1992. *The use of saline waters for crop production*. FAO Irrig. Drain. Pap. 48. FAO, Roma
- Smith, C.J., J.D. Oster, y G. Sposito, G., 2015. Potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. *Agric. Water Manag.* 157, 59-64.
- Sposito, G., 2008. *The chemistry of soils*. 2ª Ed. Oxford Univ. Press, Oxford.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., S.H.H. Shah, C.G.R. van Uffelen, P.A.C. Raats, y N. dal Ferro, 2010. Soil sodicity as a result of periodical drought. *Agric. Water Manag.* 97, 41–49.
- Wichelns, D., y M. Qadir, 2015. Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater. *Agric. Water Manag.* 157, 31-38.