

## MODELACIÓN DIRECTA E INVERSA DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN UNA PLANTACIÓN DE MANZANOS REGADA POR MICROASPERSIÓN

G. Arbat<sup>1</sup>, J. Puig<sup>1</sup>, J. Barragán<sup>2</sup>, J. Bonany<sup>3</sup>, F. Ramírez de Cartagena<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, Universidad de Girona, Campus Montilivi 17071 Girona; gerard.arbat@udg.es, jaume.puig@udg.es, francisco.ramirez@udg.es

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Lleida, Alcalde Rovira Roure 177, 25198 Lleida; Barragan@Eagrof.UdL.es

<sup>3</sup> IRTA-Estació Experimental Fundació Mas Badia, Ctra. De la Tallada, s/n, 17134 La Tallada (Girona); joan.bonay@irta.es

**RESUMEN.** La determinación de las funciones hidráulicas es un aspecto de vital importancia en la aplicación de modelos para la simulación de la dinámica del agua en el suelo, dado que los resultados de las simulaciones son sensibles a los parámetros que intervienen en las funciones hidráulicas. La modelación inversa es uno de los métodos para determinar dichos parámetros, que además permite su ajuste en condiciones similares a las del fenómeno físico que se pretende simular. En este trabajo se aplican técnicas de modelación inversa para calibrar los parámetros de las funciones de van Genuchten-Mualem (VG-M). Para ello se utilizaron las lecturas automatizadas de contenido y potencial matricial tomadas en posiciones homólogas en el suelo (*Oxyaquic Xerofluvents*) de una plantación de manzanos, regada por microaspersión. Las medidas de contenido de agua y potencial de agua en el suelo fueron tomadas con una sonda FDR y con sensores de matriz granular, respectivamente. El riego en la plantación fue gestionado de forma automatizada a partir de los valores del potencial de agua en el suelo. Las simulaciones directas e inversas fueron realizadas con el modelo HYDRUS-2D, considerando flujo en el plano vertical perpendicular a la línea de microaspersores. La extracción de agua por la planta se consideró a partir del modelo de Feddes. Una vez calibrados los parámetros de las ecuaciones de VG-M se realizaron modelaciones directas. Los datos de contenido de agua y potencial simulados se compararon con los registrados en distintas posiciones del suelo. En los horizontes superficiales, la evolución en el tiempo de las medidas experimentales y de los valores simulados siguió una misma pauta, con pequeñas diferencias entre ellos. En cambio en los horizontes más profundos, donde sólo se disponía de medidas del contenido de agua para poder calibrar el modelo, las diferencias entre los valores observados y simulados fueron importantes.

**ABSTRACT.** Determination of soil hydraulic functions is a very important aspect in the application of simulation models for soil water dynamics since results of simulations are sensitive to the parameters of soil hydraulic functions. Inverse modelling is one of the methods to estimate above mentioned parameters, allowing its adjustment in similar

conditions of simulated physical process. In the present work we use inverse modelling techniques to estimate van Genuchten-Mualem (VG-M) functions parameters. For this purpose, automatized measures of water content and matric potential in homologous positions into the soil (*Oxyaquic Xerofluvents*) in an apple orchard irrigated with micro sprinklers have been used. Water content was measured with a FDR device and soil water potential with granular matrix sensors. The irrigation in the plantation was managed automatically from soil water potential measurements. Direct and inverse simulations were performed with HYDRUS-2D model, considering flow in vertical plane perpendicular to the line of micro sprinklers. Extraction of water by plants was taken into account from Feddes model. Once VG-M equations parameters were calibrated the direct simulations were carried out. Simulated water contents and potentials were compared with recorded ones at different soil positions. In shallow horizons, evolution of simulated and measured parameters followed a similar trend. On the other hand, in deeper horizons, where water contents were the only available measurements to calibrate the model, the difference between observed and simulated values were important.

### 1. Introducción

La calidad de las predicciones de los modelos de simulación de la distribución de agua en el suelo en condiciones de campo ha sido poco explorada (Skaggs et al. 2004). En muchos trabajos la validación del modelo se realiza en condiciones de laboratorio; o incluso en los pocos casos donde se realiza el ensayo en el propio campo, las pautas de riego no se aplican siguiendo criterios agronómicos. Por otro lado la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo, punto de partida para los modelos de simulación, puede variar en varios órdenes de magnitud en función de la técnica utilizada (Abu-Zreig, 2001 y Radcliffé et al. 2002). En los casos en que sea posible resulta preferible utilizar técnicas que permitan la determinación de las propiedades hidráulicas *in situ* y en

condiciones parecidas a las que se den en el sistema de riego en particular (Shani y Or, 1995). Una de las técnicas para obtener los parámetros de las ecuaciones de flujo adaptadas a un problema particular, es la modelación inversa, que consiste en ajustar los parámetros que intervienen en las ecuaciones de forma que se minimicen las diferencias entre los valores simulados y observados. Esta técnica, cada vez más utilizada para la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo (Gribb, 1996; Simunek y van Genuchten, 1996 o Ritter et al. 2004), ha sido raramente aplicada a casos prácticos de riego (Abbasi et al. 2003-b).

Las simulaciones que se han llevado a cabo en este trabajo han sido realizadas con HYDRUS-2D (Simunek et al. 1999), un modelo numérico ampliamente utilizado para modelar el movimiento de agua en dos dimensiones, medio poroso y condiciones de no saturación, que además permite optimizar los parámetros que intervienen en las funciones hidráulicas del suelo aplicando el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

En el presente trabajo los parámetros hidráulicos del suelo se determinaron mediante técnicas de modelación inversa, utilizando datos de contenido de agua y/o potencial obtenidos en el propio ensayo. Una vez ajustados los parámetros hidráulicos, éstos se utilizaron en las modelaciones directas para predecir la distribución de agua en el suelo correspondiente a otro periodo.

Posteriormente para evaluar el modelo, se compararon sus predicciones con medidas del potencial y contenido de agua tomadas experimentalmente.

Los principales objetivos del trabajo son:

1.- Calibrar el modelo HYDRUS-2D a partir de medidas de contenido de agua y/o potencial tomadas *in situ*.

2.- Aplicar el modelo “calibrado” para predecir la evolución del contenido de agua y potencial a lo largo una serie de episodios de riego y evaluar sus predicciones comparándolas con medidas experimentales.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Experiencias de campo

Los datos utilizados en este artículo proceden de un ensayo sobre la influencia del riego en la producción y la calidad del fruto, que fueron realizados en la Estación Experimental Agrícola Mas Badia (La Tallada d’Empordà, provincia de Girona).

Las experiencias se desarrollaron en 1998 en una parcela de manzanos de la variedad GOLDEN SMOOTH® con porta injertos M9. Los árboles fueron plantados en 1997 con plantas de 2 años procedente de vivero, con lo cual ya se obtuvo cierta producción en 1998. El marco de plantación era de 3.5 x 1 m. El sistema de riego fue mediante microaspersores de 25 l h<sup>-1</sup>, separados 1 m y con un vano de lluvia que alcanzó un radio de 1 m, creando una franja mojada continua bajo los árboles.

Para realizar el presente estudio se analizaron los datos de tres tratamientos, T-15, T-30 y T-90, que consistieron en regar cuando el potencial de agua en el suelo alcanzó los:

-15,-30 y -90 kPa, respectivamente. En los 3 casos, el riego se prolongó hasta que el valor del potencial aumentó 5 kPa. Para poder aplicar los tratamientos se automatizó el sistema de captación de datos y de actuación sobre las electroválvulas del sistema de riego.

El potencial matricial se midió con sensores de matriz granular (WATERMARK®) situados a 30 cm de profundidad y a 20 cm de los emisores. Las medidas fueron tomadas en 3 repeticiones de cada uno de los tratamientos, adoptando el valor medio de las 3 repeticiones como referencia para actuar sobre el riego.

Simultáneamente, en una repetición de cada tratamiento, se tomaron medidas del contenido de agua en continuo a 10, 30, 50 y 70 cm de profundidad y 30 cm del emisor, mediante una sonda de tipo FDR-Enviroscan® (Sentek Pty. Ltd., Australia). La frecuencia en que se realizaron las medidas fue de cada media hora para el potencial y de cada 3 horas para el contenido de agua.

Según las claves del SSS (1998) el suelo se clasificó como *Typic Xerofluvents, franca-gruesa, mezclada, semiactiva, térmica*. En el perfil se distinguieron tres horizontes, de los que en la Tabla 1 se resumen sus principales características físicas.

**Tabla 1.** Principales características físicas del suelo.

(1)	Textura	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	(2)	(3)
Ap1 (0-20)	Franca	47.5	39.7	12.8	-	-
Ap2 (20-38)	Franco-arenosa	54.5	35.6	9.9	0.42 (0.10)*	1.74 (0.11)*
Bw (38-100)	Arenosa-franca	82.6	11.0	6.4	-	-

(1) Horizonte y profundidad (cm); (2) Contenido volumétrico de agua a saturación (-); (3) Densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>); \* Coeficiente de variación en tanto por uno.

### 2.2. Modelado de la dinámica del agua en el suelo

La simulación del movimiento del agua se enmarca en el contexto de la ecuación de Richards en 2 dimensiones, con la incorporación de un término sumidero (S) para contemplar la evapotranspiración:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial H}{\partial z} \right) - S \quad (1)$$

siendo  $\theta$  el contenido volumétrico de agua,  $h$  el potencial de presión,  $H$  el potencial hidráulico,  $x$  la coordenada horizontal y  $z$  la coordenada vertical.

Para ello se empleó el modelo HYDRUS-2D (Simunek et al. 1999), considerando flujo en el plano perpendicular a la línea de los microaspersores.

Las funciones hidráulicas del suelo fueron consideradas según el modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980).

La extracción de agua por la planta fue considerada a partir del modelo de Feddes (Feddes et al. 1978):

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (2)$$

en el que el término de extracción  $S$  es función del potencial de presión ( $h$ ) y de la extracción potencial de agua por la planta ( $S_p$ ).

$\alpha(h)$  es una función adimensional de respuesta al estrés hídrico que toma valores entre 0 y 1 en función del valor de  $h$ ; sus valores se tomaron de acuerdo a los presentados por Taylor y Ashcroft (1972) correspondientes a frutales de hoja caduca.

En HYDRUS-2D la extracción potencial de agua por la planta ( $S_p$ ) se calcula considerando la transpiración potencial de agua por la planta ( $T_p$ ), la extensión del sistema radicular y la intensidad de transpiración que tienen las distintas zonas del sistema radicular del cultivo (Simunek et al. 1999).

En las simulaciones la profundidad máxima donde el sistema radicular del árbol es efectivo se consideró de 0.5 m, su anchura en superficie de 1 m y su anchura a 0.5 m de profundidad de 0.25 m. Dentro de esta región se distinguieron distintas zonas donde la intensidad en la transpiración fue variable con la profundidad; en los 10 cm más superficiales la intensidad potencial de extracción de agua se consideró del 100 %, en el intervalo entre 10 y 25 cm de profundidad del 80 %, en el intervalo de 25 a 35 del 60 % y finalmente de 35 a 50 cm se consideró una intensidad potencial de transpiración del 40 %. Esta distinción en la intensidad de transpiración intenta reflejar la mayor densidad de raíces observada a poca profundidad y se apoya en el trabajo realizado por Levin et al. (1973), donde en un ensayo con manzanos pone en evidencia la alta correlación que existe entre densidad de raíces y evapotranspiración relativa.

En las simulaciones la transpiración potencial ( $T_p$ ) se consideró de 0.016 cm h<sup>-1</sup> durante el tiempo en que la evapotranspiración del cultivo fue superior a este valor; el cual es similar al calculado por Vrugt et al. (2001) en almendros.

La evaporación potencial ( $E_p$ ) se calculó a partir de la transpiración potencial ( $T_p$ ) y de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), según:

$$E_p = ET_c - T_p \quad (3)$$

A su vez, la  $ET_c$  se calculó a partir del valor de la evapotranspiración horaria de Penman-Monteith multiplicada por el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que se tomó de 0.95, de acuerdo a los valores especificados por el DARP (2001).

#### - Las condiciones iniciales y de contorno

Se definió un dominio de flujo de una extensión horizontal de 175 cm, igual a la mitad de la anchura del pasillo en la plantación, y con una profundidad de 100 cm. Durante los periodos de riego se impuso una condición de flujo constante en una anchura de 100 cm, correspondiente a la región de entrada de agua procedente de los emisores. En el resto de la superficie durante los periodos de riego y en toda la superficie durante los periodos en que no se regó, se impuso una condición de contorno atmosférica, en la que se contempló tanto un término de evaporación como la

entrada de agua de lluvia. En el límite inferior del dominio la condición fue de drenaje libre, es decir que el gradiente de potencial hidráulico fue igual a la unidad. A ambos lados del dominio de flujo la condición impuesta fue de ausencia de flujo.

En la zona superficial del suelo la malla utilizada fue relativamente densa, con elementos triangulares de profundidad igual a 1 cm. A medida que aumentó la profundidad, la dimensión vertical de los elementos se incrementó hasta 2 cm. La anchura de los elementos fue constante e igual a 2.8 cm a lo largo de todo el dominio. Esta mayor densidad en la zona más superficial se justifica por ser la zona más activa en el movimiento de agua, debido tanto a la infiltración como a la evaporación.

Las condiciones iniciales adoptadas fueron los contenidos de agua medidos con la sonda ENVIROSCAN<sup>®</sup> corregidos según el método descrito más adelante.

#### - Estrategias en la modelación inversa

La técnica de modelación inversa se aplicó para la optimización de los parámetros de las ecuaciones de van Genuchten-Mualem (VG-M), inicialmente estimados a partir de ecuaciones de edafotransferencia elegidas a partir de la teoría de redes neuronales mediante el código ROSETTA (Schaap et al. 2001). Para ello se minimizó la función objetivo que tiene en cuenta las diferencias entre los contenidos y potenciales de agua medidos y simulados.

El proceso de optimización se realizó en varias etapas. En una primera se optimizó el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) y la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), considerando los dos primeros horizontes  $Ap_1$  y  $Ap_2$  conjuntamente. Posteriormente se optimizó el parámetro de forma  $n$  y el contenido de agua residual ( $\theta_r$ ) y finalmente en una tercera modelación se optimizó el parámetro  $\theta$ .

Los datos utilizados para realizar la calibración correspondieron a las medidas tomadas entre el 11 y 22 de mayo de 1998 en el tratamiento T-15.

#### - Corrección de los contenidos de agua medidos en campo

Los dos tipos de sensores respondieron de forma análoga a los episodios de riego y de redistribución. Las sondas WATERMARK<sup>®</sup> detectaron reducciones en el valor absoluto de potencial al mismo tiempo que la sonda ENVIROSCAN<sup>®</sup> detectó aumentos del contenido de agua en el suelo.

Sin embargo el contenido de agua medido en campo con la sonda ENVIROSCAN<sup>®</sup> mostró en algunos casos valores superiores a los esperables para la textura del suelo, superándose incluso los valores de contenido de agua correspondientes al valor de saturación.

Por este motivo se corrigieron las medidas de contenido de agua tomadas con ENVIROSCAN<sup>®</sup>. Para ello se obtuvo la curva de retención en a partir de medidas simultáneas de contenido de agua y potencial tomadas en campo, correspondientes al tratamiento T-90 entre el 7 y 30 de junio de 1998. Este periodo se caracterizó por la ausencia de lluvias y episodios de riego en el tratamiento, por lo cual

se dispone de un amplio rango en los valores de potencial-contenido de agua.

La curva de retención en campo se comparó con la obtenida en laboratorio mediante placas de presión y se observó que las dos curvas transcurrían paralelas, siendo los contenidos de agua en la curva obtenida en campo un 9 % superiores a los de la curva de laboratorio, por lo cual se aplicó esta corrección.

- Las modelaciones directas y comparación de sus resultados con las medidas de campo

Una vez calibrados los parámetros de las ecuaciones de VG-M se simuló la distribución de agua en el suelo a lo largo del mes de junio en el tratamiento T-30.

La evolución del contenido de agua y potencial simulados con el modelo se comparó gráficamente con las medidas efectuadas en las distintas profundidades. Además, se determinó la diferencia entre los valores simulados y observados a partir de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y de la realización de una regresión lineal entre los valores simulados y observados.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Optimización de los parámetros

En la Tabla 2 se indican los valores de los parámetros de las ecuaciones de van Genuchten-Mualem (VG-M), su intervalo de confianza y el coeficiente de determinación del ajuste.

En la primera etapa, donde se optimizó el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) y la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), considerando los horizontes  $Ap_1$  y  $Ap_2$  conjuntamente, la reducción en la suma de cuadrados de los residuos ponderados (SSQ) en la función objetivo fue importante. Se pasó de un valor de SSQ de 0.876, cuando se utilizaron los parámetros estimados con ROSETTA, a 0.492 tras esta primera optimización.

Al representar gráficamente los residuos ponderados se comprobó que se distribuían de forma aleatoria y que estaban centrados alrededor de cero, lo que indica que la ponderación atribuida a las medidas fue adecuada.

En la segunda fase de optimización se consideraron los tres horizontes descritos y se optimizó el parámetro de forma  $n$  y el contenido de agua residual ( $\theta_r$ ). Esta estrategia logró reducir ligeramente el valor de SSQ, pasando de 0.492 a 0.413 tras 8 iteraciones.

En la tercera etapa, en la que se optimizó el parámetro  $\alpha$ , no se consiguió reducir el valor de SSQ.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) en la correlación entre los parámetros observados y simulados fue de 0.995 tras la primera calibración y de 0.996 tras la segunda y tercera.

La desviación absoluta en la estimación de un parámetro se midió con el T-valor, que se calculó como el cociente entre el valor estimado del parámetro y su error estándar; por lo tanto un T-valor mayor indica una menor desviación

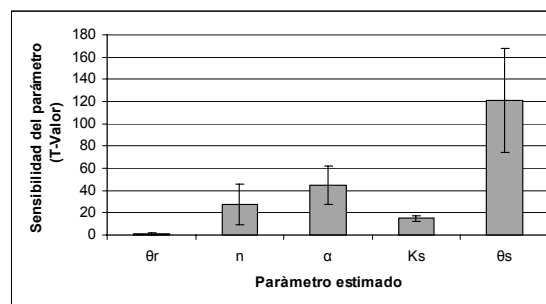
absoluta del parámetro y una mayor sensibilidad del parámetro en las predicciones del modelo.

**Tabla 2.** Parámetros optimizados de las ecuaciones de van Genuchten-Mualem

Prof. (cm)	$\theta_r^*$ (-)	$\theta_s^*$ (-)	$\alpha^*$ (cm <sup>-1</sup> )	$n^*$	$K_s^*$ (cm h <sup>-1</sup> )
Ap1 (0-20)	0.017 ± 0.3387	0.4034 ± 0.0085	0.022 ± 0.0013	1.390 ± 0.489	1.135 ± 0.1945
Ap2 (20-38)	0.0012 ± 0.4579	0.4034 ± 0.0085	0.021 ± 0.0023	1.2050 ± 0.289	1.135 ± 0.1945
Bw1 (38-100)	0.035 ± 0.0201	0.4943 ± 0.0177	0.039 ± 0.0009	1.7248 ± 0.0492	7.043 ± 0.7483

(\*) Los intervalos de confianza de los parámetros estimados fueron determinados con una probabilidad del 95 %.

En la Fig. 1 se indica el T-valor medio y su desviación estándar para cada uno de los parámetros de las ecuaciones de VG-M en los distintos horizontes. Estos resultados mostraron que los parámetros de la ecuación de VG-M tienen distinto grado de sensibilidad en las predicciones del modelo. A juzgar por la magnitud de los T-valores, los resultados fueron más sensibles a las variaciones de contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ), seguido del factor alfa ( $\alpha$ ), de  $n$  y de la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), y en menor medida al contenido de agua residual ( $\theta_r$ ).



**Fig. 1.** T-valores asociados a los parámetros de las ecuaciones de van Genuchten-Mualem.

Los resultados obtenidos concuerdan con los de Abbasi et al. (2003-b), quienes en un ensayo en un campo regado por surcos, realizaron una optimización inversa de los parámetros de la ecuación de VG-M en un suelo con distintos horizontes. El resultado del análisis de sensibilidad realizado por estos autores mostró que el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) y  $n$  fueron los parámetros que tuvieron mayor sensibilidad en los resultados del modelo. En el mismo sentido, Ritter et al. (2004) confirmaron que el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) es el parámetro que más influencia tiene en los resultados de las simulaciones del movimiento de agua en una columna de suelo volcánico estratificado.

En el presente trabajo los parámetros que se obtuvieron aplicando el método de modelación inversa tuvieron sentido físico; la conductividad hidráulica saturada y el contenido de agua residual estimados correspondieron a los propios en suelos de la clase textural a la que pertenecen (Carsel y Parrish, 1988).

En el horizonte  $Ap_2$ , el contenido de agua a saturación determinado en el laboratorio a partir de una muestra de suelo tamizada y secada al aire, resultó ser de  $0.42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , valor ligeramente superior al estimado en la modelación inversa. El resultado es consistente con el hecho que cuando  $\theta_s$  se determina en el campo su valor suele ser inferior a la porosidad, debido al aire que queda atrapado (Klute, 1986), mientras que cuando se realiza la determinación en el laboratorio, con la estructura del suelo alterada, el valor de  $\theta_s$  resulta superior al valor de campo (Abbasi et al. 2003-a).

En el horizonte  $B_{w1}$  el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) en la calibración resultó superior al que correspondería a un suelo de esta textura. Esta diferencia puede ser explicada por la corrección que se aplicó a los valores de contenido de agua medidos a partir de ENVIROSCAN®, que se realizó a partir de la comparación de la curva de retención correspondiente al horizonte  $Ap_2$ . Probablemente la corrección de un 9 % del contenido volumétrico de agua, adecuada para los horizontes  $Ap_1$  y  $Ap_2$ , debería haber sido distinta en el horizonte  $B_{w1}$ .

### 3.2. Evolución del contenido de agua y del potencial en las modelaciones. Comparación con los datos experimentales

En la Tabla 3 se presentan los estadísticos de comparación entre los contenidos de agua simulados y observados y en la Tabla 4 los correspondientes a la comparación de los valores del potencial.

**Tabla 3.** Estadísticos de comparación entre los contenidos de agua simulados y observados en las modelaciones directas.

Profundidad (cm)	10	30	50	70
Nº valores	248	248	248	248
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0.039	0.012	0.073	0.090
$R^2$ ajustado	0.731	0.733	0.377	0.249
$P_0$	0.000	0.970*	0.000	0.000
$P_1$	0.000	0.000	0.000	0.000

$P_0$ : P-valor en el contraste de hipótesis para la constante de la recta de regresión de los contenidos de agua modelados y observados

$P_1$ : P-valor en el contraste de hipótesis para la pendiente de la recta de regresión de los contenidos de agua modelados y observados

**Tabla 4.** Estadísticos de comparación entre los potenciales simulados y observados en las modelaciones directas.

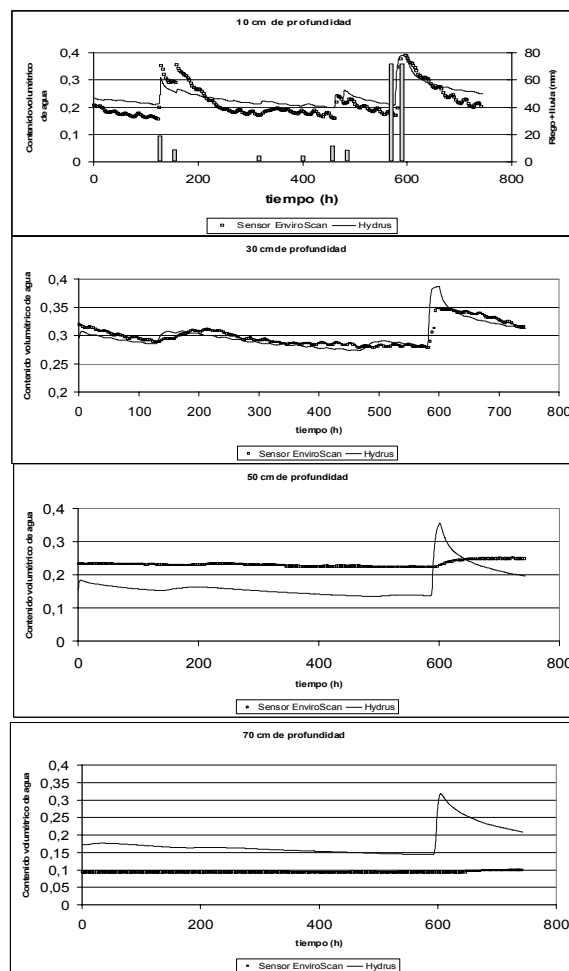
Nº de valores	RMSE (kPa)	$R^2$ ajustado	$P_0$	$P_1$
1475	5.2	0.792	0.000	0.000

En los resultados de la Tabla 3 se destaca que el RMSE y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) al comparar los valores simulados y observados indican un mejor ajuste a la profundidad de 30 cm, que corresponde precisamente a la profundidad en la que se tomaron medidas del potencial y del contenido de agua para realizar la calibración del modelo. El ajuste a la profundidad de 10 cm también indica una elevada correlación ( $R^2 = 0.731$ ), en cambio a 50 y 70 cm de profundidad la correlación entre los valores observados y simulados es muy baja ( $R^2 = 0.377$  y  $0.249$  respectivamente).

La correlación entre los potenciales observados y simulados, que se indica en la Tabla 4, también es elevada ( $R^2 = 0.792$ ).

Dada la elevada correlación existente entre los valores observados y simulados a 10 y 30 cm de profundidad, así como los bajos valores de la RMSE, el modelo HYDRUS-2D una vez calibrado podría utilizarse como herramienta para la gestión del riego.

En este sentido la Fig. 2 muestra que la evolución de los contenidos de agua observados y simulados sigue una evolución muy similar para las profundidades de 10 y 30 cm, con incrementos del contenido de agua ligados a episodios de riego o lluvia, tal y como se indica en la parte superior de la Fig. 2.



**Fig. 2.** Evolución del contenido de agua observado y simulado a lo largo del mes de junio.

En cambio la evolución de los contenidos de agua observados y simulados a 50 y 70 cm de profundidad muestran un comportamiento muy distinto, observándose un incremento en el contenido de agua a las 600 h de simulación que no se aprecia en las medidas de campo.

Este hecho pone en evidencia que los parámetros de la ecuación de VG-M correspondientes al horizonte  $B_{w1}$ , ajustados mediante modelación inversa no han

proporcionado buenos resultados. Pueden señalarse varias causas que lo justifiquen:

a) La corrección del contenido de agua medido con la sonda ENVIROSCAN<sup>®</sup>, basado en comparar la curva de retención medida en campo con la curva obtenida en el laboratorio, se realizó con valores correspondientes al horizonte  $Ap_2$ . Esta corrección podría no ser válida para el horizonte  $Bw$ .

b) Otra causa podría ser que en el horizonte  $Bw$  sólo se dispuso de medidas experimentales del contenido de agua para realizar la calibración, mientras que para el horizonte  $Ap_2$  se dispuso de valores de contenido y potencial, lo cual mejora los resultados de la calibración (Ritter et al. 2004).

En la Fig. 3 se muestra que los potenciales observados y simulados siguen una evolución paralela, aunque en la mayor parte del periodo el potencial simulado se encuentra 5 kPa por debajo de los observados. El potencial observado a lo largo del mes de junio osciló entre los -9 y -30 kPa, mientras que el simulado lo hizo entre -2 y -26 kPa.

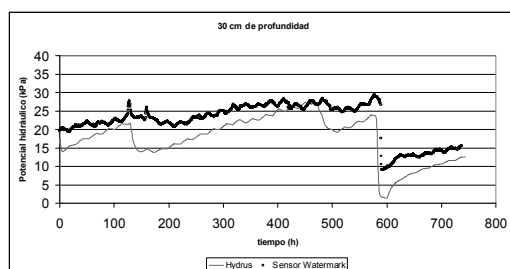


Fig. 3. Evolución del potencial de agua en el suelo observado y simulado a lo largo del mes de junio.

#### 4. Conclusiones

4.1. El método de modelación inverso permite determinar los parámetros de las funciones hidráulicas del suelo según el modelo de van Genuchten-Mualem a partir de medidas del contenido de agua y potencial tomadas en campo. Sin embargo, las funciones hidráulicas que se obtienen no siempre reflejan correctamente el comportamiento del suelo, existiendo una diferencia importante entre los horizontes en que únicamente se dispone de medidas de contenido de agua y en los que además se dispone de medidas de potencial.

4.2. Las predicciones del modelo, correspondientes a los horizontes en que la calibración se realizó a partir de datos de contenido de agua y potencial, siguieron la misma pauta de comportamiento que las medidas experimentales. La RMSE al comparar el contenido de agua observado y simulado estuvo por debajo de  $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y la RMSE en al comparar los potencial potenciales observados y simulados fue de 5.2 kPa.

Cuando la calibración se realizó únicamente con medidas de contenido de agua, como sucedió en el horizonte  $Bw$ , el RMSE en la estimación del contenido de agua alcanzó los  $0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

4.3. Teniendo en cuenta la precisión de los sensores utilizados para la gestión del riego y la variabilidad que puede existir en las medidas tomadas en distintas zonas de la parcela, la diferencia entre los valores observados y

simulados a 10 y 30 cm puede considerarse lo suficientemente pequeña para afirmar que los resultados del modelo pueden utilizarse para gestionar los riegos.

#### Referencias

- Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., van Genuchten, M. T. y Shouse, P. J. 2003-a. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Homogeneous soil. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 46 (4), 1085-1095 pp.
- Abbasi, F., Jacques, D., Simunek, J., Feyen, J. y van Genuchten, M. T. 2003-b. Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 46 (4), 1097-1111 pp.
- Abu-Zreig, M. 2001. Measurement of saturated hydraulic conductivity with various techniques. *ASAE Annual international Meeting 2001-Paper n° 012258*. Sacramento, California.
- Carsel, R. y Parrish, R. 1988. Developing joint probability of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24 (5), 755-769 pp.
- DARP. 2001. PACREG 4.1. Una herramienta para el uso eficiente del agua de riego en la parcela. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Barcelona.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J. y Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Simulation monographs*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen.
- Gribb, M. M. 1996. Parameter estimation for determining hydraulic properties of a fine sand from transient flow measurements. *Water Resources Research*, 32 (7), 1965-1974 pp.
- Klute, A. 1986. *Water Retention: Laboratory Methods*. A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 799-823 pp. Madison, Wisconsin.
- Levin, I., Bravdo, B. y Assaf, R. 1973. Relation between apple root distribution and soil water extraction in different irrigation regimes. Hadas et al. (Ed.). *Ecological Studies. Analysis and Synthesis*. 351-359 pp. Berlin.
- Radcliffe, D. E. y Rasmussen, T. C. 2002. *Soil Water Movement*. Warrick, A.W. (Ed.). *Soil Physics Companion*. 85-126 pp. Boca Raton, Florida.
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., Regalado, C. M., Vancloster, M. y Lambot, S. 2004. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Journal of Hydrology*, 295, 124-139 pp.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. y van Genuchten, T. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176 pp.
- Shani, U. y Or, D. 1995. In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity. *Water Resources Research*, 31 (8), 1863-1870 pp.
- Simunek, J., Sejna, M. y van Genuchten, M. T. 1999. HYDRUS-2D, software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and solute transport in variably-saturated media. U.S. Salinity Laboratory. Riverside, California.
- Simunek, J. y van Genuchten, M. T. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension disc infiltrometer data. *Soil Science*. 162 (6), 383-398 pp.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J. y Shouse, P. J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130 (4), 304-310 pp.
- Soil Survey Staff, SSS. 1998. *Keys to Soil Taxonomy*. Natural Resources Conservation Service. USDA. Washington D.C., 326 pp.
- Taylor, S. y Ashcroft, G. 1972. *Physical edaphology*. W. H. Freeman & Co. San Francisco.
- van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (5), 892-898 pp.
- Vrugt, J. A., Hopmans, J. W. y Simunek, J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America*, 65 (4), 1027-1037 pp.