

## VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA EN SUELOS DE OLIVAR Y SU INFLUENCIA EN EL BALANCE HIDROLÓGICO GLOBAL

M.J. Polo<sup>1</sup>, P. Lafuente y J.V. Giráldez

<sup>1</sup>Dpto. Agronomía, ETSI Agrónomos y Montes, Universidad de Córdoba, Apdo. 3048, 14080 Córdoba. mjpolo@uco.es

**RESUMEN.** La conductividad hidráulica saturada es un parámetro físico del suelo que interviene en todos aquellos procesos relacionados con el movimiento de agua y solutos a través del mismo. Por ello, constituye uno de los descriptores fundamentales de la naturaleza de un suelo, utilizándose a menudo para estimar otros parámetros más complejos de determinar. La variabilidad espacial de su valor en las capas superficiales del suelo es inherente a las características del suelo, por constituir este un medio complejo. No obstante, en sistemas agrícolas como el olivar, existen zonas diferenciadas en cuanto al manejo de suelo, aplicación de sustancias, intensidad y cantidad de lluvia recibida, etc., en las cuales pueden producirse variaciones significativas de, en este caso, la conductividad hidráulica, que induzcan resultados diferentes cuando se utilizan valores promedio como entrada de modelos hidrológicos, diferencias que se acentúan si el resto de entradas al modelo presentan una determinada distribución espacial (por ejemplo, aplicación de herbicidas). Este trabajo evalúa las fuentes extrínsecas de variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada en la superficie del suelo en suelos de olivar, y analiza la repercusión de esta variabilidad en el balance hidrológico global en función de la intensidad de lluvia considerada, y el contenido de agua inicial del suelo. Los resultados muestran cómo la posición a lo largo de la ladera es el factor que ha inducido más diferencias a la hora de promediar espacialmente los valores de  $k_s$ . Estas diferencias afectan al balance de agua en la superficie del suelo, no sólo espacialmente, pues hay zonas de la ladera que no llegan a encharcarse para las condiciones del análisis, sino también cuantitativamente, con casos extremos aquellos en los que el valor promediado de  $k_s$  en la ladera es superior a la intensidad de lluvia considerada, conduciendo a una producción nula de escorrentía, aun cuando de forma localizada esta sí se genera.

**ABSTRACT.** The saturated hydraulic conductivity,  $k_s$ , is a physical parameter included in all process related to water and solute movement through soil. It constitutes a relevant characteristic of soil and many other soil parameter values are usually derived from it. The spatial variability of  $k_s$  in the soil surface is inherent to the complexity of this

medium. However, in agricultural soils such as olive tree areas, local differences very often arise as a result of a differential soil management, nutrient application, rainfall intensity and amount, etc., which may induce significant variations of  $k_s$ . Since the area associated to each one of these local zones may differ, this fact results in differences in the hydrological and hydraulic models used, more increased when other input parameters (e.g., herbicide application) are distributed following a spatial pattern. This work analyses some external sources of spatial variability in the measured value of  $k_s$  in the soil surface of an olive grove, and its effects on the global water balance as a function of rainfall intensity, and initial water content of soil. The results show how the position along the slope is the most determining factor inducing variability of  $k_s$ , inducing areas with no runoff generation in some cases. Extreme examples correspond to global values of  $k_s$  above the rainfall intensity considered, resulting in no runoff generation, whereas rainfall excess is locally found in the upper zones.

---

### 1. Introducción

La conductividad hidráulica saturada,  $k_s$ , constituye, quizás, el parámetro físico de un suelo más determinante a la hora de cuantificar las diferentes componentes del balance global de agua en la superficie del mismo. Una adecuada modelación de los procesos de infiltración y generación de escorrentía requiere precisar el valor de  $k_s$ , por lo que es un parámetro de entrada obligado en modelos hidráulicos e hidrológicos, y en aquellos derivados, como los correspondientes a procesos erosivos, de transporte de masa en general a través del suelo, o de transferencia de sustancias al flujo superficial de escorrentía (Hillel, 1998). A menudo los valores de  $k_s$  utilizados en un estudio se estiman a partir de características del suelo menos variables y más simples de medir, o se adoptan valores promediados a partir de muestreos de campo, aun cuando se apliquen modelos distribuidos. Actualmente, el desarrollo de herramientas como SIG, permite a partir de

medidas puntuales interpolar espacialmente en toda el área estudiada. No obstante, la integración de los resultados de un modelo distribuido puede ser muy diferente al resultado obtenido cuando se adoptan valores promediados espacialmente para los parámetros del suelo, en este caso,  $k_s$ , existiendo cierta discusión sobre el orden en el que se debe llevar a cabo el proceso: calcular e interpolar o viceversa.

A la variabilidad espacial intrínseca de un medio complejo como es el suelo, se le puede añadir una componente extrínseca derivada de un manejo diferenciado de una o varias actividades, en el caso de suelos agrícolas: paso de maquinaria, aplicación de sustancias, diferente cobertura vegetal. En el cultivo de olivar, se pueden considerar, entre otras, tres fuentes externas de variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo, a igualdad de manejo del mismo: a) posición a lo largo de la ladera, b) posición con respecto a la copa del árbol y c) bajo copa, en zonas con pendiente, se observa una acumulación de material procedente de puntos más altos, en la zona aguas arriba del tronco, que actúa como obstáculo frente al flujo de escorrentía superficial. Otras características como el marco de plantación, edad de los árboles (desarrollo de la copa), etc., determinan la importancia de cada una de estas zonas dentro del área global de estudio. La adopción, cada vez más frecuente, de alternativas de manejo de suelo que reducen el uso de maquinaria pesada conduce a una intensificación de estas fuentes de variabilidad.

Los objetivos de este trabajo son, por un lado, cuantificar la variabilidad de  $k_s$  en suelos de olivar bajo laboreo mínimo según la localización con respecto al árbol y, por otra, analizar la repercusión de dicha variabilidad en el balance precipitación-infiltración-escorrentía y en los flujos de masa asociados.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Descripción de la zona de estudio

La finca de olivar del Valle del Guadalquivir donde se realizaron los ensayos, pertenece al término municipal de La Rambla en la provincia de Córdoba. Se eligió una ladera de olivar joven (edad de plantación, siete años; un pie por árbol; marco cuadrado de 7x7 m) de 80 m de longitud y pendiente uniforme alrededor del 12%, en la que el manejo practicado es laboreo mínimo desde el inicio de la plantación. El suelo se clasifica como Xerochrepts en el sistema de taxonomía americano, y algunas características relevantes de su horizonte superficial (0-20 cm) se recogen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Características del suelo en la zona en estudio.

arcilla	limo	arena	Clase textural	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> %	pH agua	M.O. %	C.I.C. mol/kg
31.8	25.8	42.4	Fr-arc-are	29.9	8.0	1.75	0.131

Se efectuó la medida *in situ* de  $k_s$  en diferentes puntos de la ladera, utilizándose como fuentes extrínsecas de la variabilidad espacial de su valor a) localización en la ladera, esto es, zona superior o inferior de la misma, y b) localización con respecto al árbol, es decir, bajo copa o entre calles (fuera de copa), distinguiéndose asimismo bajo copa la zona situada aguas arriba del tronco y aguas abajo, según la dirección de máxima pendiente. Con este esquema, se eligieron cinco olivos en la zona superior y otros cinco en la inferior. En el área asociada a cada uno de ellos se realizó la medida de  $k_s$  para las tres zonas diferenciadas en el caso b), llevándose a cabo tres medidas para cada una de ellas. Para cada localización se calculó el valor medio de las quince medidas individuales obtenidas, tras la eliminación de los extremos mediante el test de outliers. Asimismo, se obtuvieron los diferentes valores medios espaciales de  $k_s$ , ponderados con la superficie asociada en cada caso, con los supuestos:

- Bajo copa, las zonas aguas arriba y aguas abajo del tronco son iguales; es decir,  $k_{s \text{ bajo copa}} = 0,5(k_{s \text{ aguas arriba}} + k_{s \text{ aguas abajo}})$ .
- Las características de la plantación (edad, marco y variedad) permiten considerar que el área bajo copa constituye el 30% de la superficie asociada a un olivo (de Luna, 1994; Pastor *et al.*, 1998); por tanto  $k_{s \text{ ladera superior (o inferior)}} = 0,7k_{s \text{ entre calles}} + 0,15k_{s \text{ aguas arriba ladera superior}} + 0,15k_{s \text{ aguas abajo ladera superior}}$ .
- Finalmente, se asigna un 50% del área total a los valores obtenidos para la zona superior e inferior, respectivamente. Así,  $k_{s \text{ ladera}} = 0,5(k_{s \text{ ladera superior}} + k_{s \text{ ladera inferior}})$ .

### 2.2. Determinación de la conductividad hidráulica saturada

Existen diferentes métodos para determinar *in situ* el valor de  $k_s$  y, tanto su aplicabilidad como el nivel de confianza de los resultados que proporcionan, han sido comparados por numerosos autores para diferentes condiciones de campo (e.g. Lee *et al.*, 1985; Paige y Hillel, 1993; Mohanty *et al.*, 1994; Vanderlinden *et al.*, 1998; Muñoz-Carpena *et al.*, 2002). En este trabajo se ha elegido el método de Philip-Dunne (de Haro *et al.*, 1998) dado que, para el número de medidas a realizar, ofrecía las ventajas de fácil construcción y manejo, bajo coste y necesidad de personal, y menor duración del ensayo (García-Sinovas *et al.*, 2001). Todo ello permitió realizar las medidas en distintos puntos de forma solapada en el tiempo, y completar el ensayo en un periodo de tres días. De forma resumida, este método utiliza un infiltrómetro de carga variable, consistente en un tubo cilíndrico que se inserta en el suelo hasta una profundidad  $h/2$ , siendo  $h$  la altura inicial de agua sobre el suelo en el extremo inferior del tubo. A partir de 1) los valores del tiempo que tarda el nivel del agua en descender hasta  $h/2$  desde el nivel inicial, y en alcanzar el extremo inferior del cilindro, 2) la geometría del cilindro y 3) el contenido de agua del suelo inicial y final, y bajo las hipótesis de Green y Ampt para infiltración, Philip (1993) obtuvo una expresión que permite calcular el valor de  $k_s$  (de Haro *et al.*, 1998).

En estos ensayos se han usado cilindros de metacrilato de 6 cm de diámetro interior; la profundidad a la que se insertaron en el suelo,  $h/2$ , osciló entre 5 y 10 cm según los puntos. El contenido de agua del suelo inicial y del bulbo húmedo final se determinó gravimétricamente en muestras tomadas en cada punto para ambos momentos.

### 2.3. Influencia de la variabilidad local de $k_s$ en el balance infiltración/exceso de lluvia

La variación local de  $k_s$  puede influir en el balance de agua en la superficie del suelo durante un episodio de lluvia, en mayor o menor grado según la escala de cálculo del mismo. Para evaluar esta influencia, se ha determinado de forma local, es decir, para el valor de  $k_s$  correspondiente a cada caso individual, y de forma global, para los distintos valores promediados de  $k_s$ , el exceso de lluvia correspondiente a diferentes intensidades de precipitación, utilizando para este cálculo la aproximación analítica de Green y Ampt (e.g. Bras, 1990). Los parámetros de entrada requeridos por el modelo son conductividad hidráulica saturada,  $k_s$ ; contenido de agua del suelo inicial y final,  $\theta_0$  y  $\theta_s$ ; potencial matricial en el frente de humedecimiento del suelo,  $\psi_{mf}$ . Para una lluvia de intensidad y duración dadas, el modelo permite calcular las condiciones del estado de encharcamiento (momento en el que se produce,  $t_e$ , e infiltración acumulada hasta entonces,  $I_e$ ) y para cualquier instante posterior la infiltración acumulada,  $I$ . El exceso de lluvia acumulado para ese instante,  $E_x$ , se calcula por diferencia con la precipitación recibida,  $P$  (se desprecia la evaporación durante el chubasco).

En este análisis,  $k_s$  y  $\theta_s$  se han obtenido a partir de las medidas de campo (tablas 3 y 4); el valor de  $\psi_{mf}$  se ha estimado en -142 mm, en todos los casos, a partir de los diagramas propuestos por Rawls *et al.* (1983), utilizando el contenido de arcilla, arena y materia orgánica del suelo, y las características de manejo del mismo como parámetros de entrada. Los cálculos se han efectuado para dos valores iniciales de  $\theta_0$ , 50 y 25% de  $\theta_s$ , y para las intensidades de lluvia,  $r$ , correspondientes a episodios de 1h de duración y periodo de retorno,  $T$ , igual a 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (tabla 4), características de la zona (García-Marín, 1994).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Variabilidad de la conductividad hidráulica saturada

La tabla 2 muestra el valor medido medio de  $k_s$  en cada caso analizado, junto con los diferentes valores promediados obtenidos. Se puede observar una gran variabilidad en aquellas medidas equivalentes, hecho observado por numerosos autores al analizar propiedades físicas en el suelo (e.g. Warrick y Nielsen, 1980) Los valores locales son en general mayores bajo copa que entre calles, debido a la mayor compactación que sufren estas zonas. Sin embargo las mayores diferencias locales se

encuentran con respecto a la posición a lo largo de la ladera. Los puntos en la zona inferior de la ladera presentan un valor de  $k_s$  significativamente mayor que sus equivalentes en la zona superior, sobre todo bajo la copa del árbol. Esto puede explicarse pues las cotas superiores sufren mayor riesgo de erosión y tienden por ello a compactarse más. Este hecho ha sido observado por los autores en medidas efectuadas para condiciones similares (datos sin publicar).

En general, las diferencias con respecto a la posición del árbol son más marcadas asimismo en las cotas más bajas de la ladera. Por último, en la zona bajo copa aguas arriba del tronco se observa una disminución de  $k_s$  con respecto a los puntos localizados aguas abajo. Esto puede deberse al depósito de partículas de suelo de la zona aguas arriba del tronco, con tamaños más finos y mayor acumulación de restos de vegetación, al actuar el tronco como obstáculo y freno del flujo de escorrentía superficial.

**Tabla 2.** Valores locales de  $k_s$

Zona			$k_s$	$\sigma$	$n$
parcela			mm/h		
Superior	Entre calles		2.5	2.6	12
	Bajo copa	Aguas arriba	3.6	2.1	11
		Aguas abajo	5.0	4.1	14
		Promedio	4.3		
Promedio			3.1		
Inferior	Entre calles		5.4	3.9	10
	Bajo copa	Aguas arriba	17.1	16.4	11
		Aguas abajo	30.9	16.2	11
		Promedio	24.0		
Promedio			11.0		
Promedio			7.0		

$n$ , número de datos utilizados en el cálculo

La tabla 3 muestra el contenido de agua final del bulbo húmedo del suelo, saturado,  $\theta_s$ , observándose apenas variabilidad en los resultados o en los promedios obtenidos.

**Tabla 3.** Valores locales de  $\theta_s$

Zona			$\theta_s$	$\sigma$	$n$
parcela					
Superior	Entre calles		0.23	0.007	15
	Bajo copa	Aguas arriba	0.25	0.074	14
		Aguas abajo	0.26	0.110	15
		Promedio	0.26		
Promedio			0.25		
Inferior	Entre calles		0.21	0.045	15
	Bajo copa	Aguas arriba	0.24	0.042	15
		Aguas abajo	0.24	0.028	14
		Promedio	0.24		
Promedio			0.23		
Promedio			0.24		

$n$ , número de datos utilizados en el cálculo

### 3.2. Aplicación del modelo de Green y Ampt

Las tablas 4 y 5 muestran el valor obtenido para  $I_e$  utilizando los valores anteriores de  $k_s$ , para cada supuesto

de contenido inicial de agua del suelo contemplado. Se observa cómo la variabilidad local de  $k_s$  induce, para las intensidades de lluvia más bajas (por otra parte, las más frecuentes) zonas en las que no se genera escorrentía alguna frente a otras en las que sí. Los casos en los que no se alcanza el estado de encharcamiento corresponden a aquellos valores de  $r$  inferiores al correspondiente de  $k_s$ . Los resultados entre paréntesis corresponden a aquellos

casos en los que el estado de encharcamiento se alcanzaría únicamente si la duración de la lluvia fuera suficiente para ello (en todo caso superior a 1h). Es obvio señalar que la ausencia de exceso de lluvia es más marcada cuando  $\theta_0$  es menor. Las diferencias se amortiguan a medida que  $r$  aumenta

**Tabla 4.** Infiltración acumulada en el encharcamiento,  $I_e$  (mm), a partir de Green y Ampt ( $\theta_0 = 0.5 \theta_b$ ).

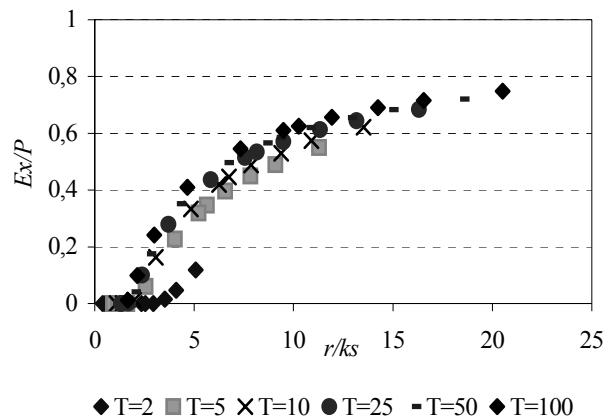
Zona parcela		$r_{1h}$ (mm/h):	12.7	28.2	33.8	40.8	46.1	51.3
		T (años):	2	5	10	25	50	100
Superior	Entre calles		4.1	1.6	1.3	1.1	1.0	0.9
	Bajo copa	Aguas arriba	7	2.6	2.1	1.7	1.5	1.3
		Aguas abajo	11.8	3.9	3.2	2.6	2.2	2.0
		Promedio	9.2	3.2	2.6	2.1	1.9	1.6
	<b>Promedio</b>		<b>5.6</b>	<b>2.2</b>	<b>1.8</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	<b>1.1</b>
Inferior	Entre calles		10.9	3.5	2.8	2.2	2.0	1.7
	Bajo copa	Aguas arriba	--	26.5	17.5	12.3	10.3	8.5
		Aguas abajo	--	--	(185.9)	(53.1)	34.7	25.8
		Promedio	--	(99.4)	(42.0)	24.3	18.6	15.0
	<b>Promedio</b>		<b>(102.6)</b>	<b>10.4</b>	<b>7.8</b>	<b>6.0</b>	<b>5.1</b>	<b>4.4</b>
<b>Promedio</b>		<b>(21.0)</b>	<b>5.6</b>	<b>4.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3.0</b>	<b>2.7</b>	

**Tabla 5.** Infiltración acumulada en el encharcamiento,  $I_e$  (mm), a partir de Green y Ampt ( $\theta_0 = 0.25 \theta_b$ ).

Zona parcela		$r_{1h}$ (mm/h):	12.7	28.2	33.8	40.8	46.1	51.3
		T (años):	2	5	10	25	50	100
Superior	Entre calles		6.1	2.4	2.0	1.6	1.4	1.3
	Bajo copa	Aguas arriba	10.5	3.9	3.2	2.6	2.3	2.0
		Aguas abajo	(17.7)	5.9	4.8	3.8	3.3	3.0
		Promedio	(13.8)	4.8	3.9	3.2	2.8	2.5
	<b>Promedio</b>		<b>8.5</b>	<b>3.2</b>	<b>2.7</b>	<b>2.2</b>	<b>1.9</b>	<b>1.7</b>
Inferior	Entre calles		(16.3)	5.2	4.2	3.4	2.9	2.6
	Bajo copa	Aguas arriba	--	(39.7)	26.3	18.5	15.1	12.8
		Aguas abajo	--	--	(278.9)	(79.7)	(52.1)	38.7
		Promedio	--	(99.4)	(42.0)	24.3	18.6	15.0
	<b>Promedio</b>		<b>(153.9)</b>	<b>15.6</b>	<b>11.7</b>	<b>9.0</b>	<b>7.6</b>	<b>6.6</b>
<b>Promedio</b>		<b>(31.5)</b>	<b>8.5</b>	<b>6.7</b>	<b>5.3</b>	<b>4.6</b>	<b>4.0</b>	

Para cada episodio de lluvia se ha calculado, asimismo, el exceso de lluvia generado. Los resultados se presentan en los gráficos 1 y 2, de forma adimensional. Se puede observar cómo para periodos de retorno iguales o superiores a cinco años, los resultados están muy agrupados, diferenciándose claramente los correspondientes a las lluvias de mayor frecuencia. Un mayor contenido inicial de agua en el suelo desplaza las curvas obtenidas hacia la izquierda.

A partir de los resultados de las tablas 4 y 5, y las figuras 1 y 2, se puede analizar la representatividad de los datos obtenidos a partir de los valores promediados de  $k_s$ . Así, por ejemplo, para  $T=5$  años y  $\theta_0 = 0.5 \theta_b$ , el valor de  $E_x/P$  global promediado espacialmente a partir de los cálculos locales sería de un 43% de la lluvia recibida, mientras que su valor calculado directamente utilizando el valor promediado de  $k_s$  para toda la ladera, es un 30% de la lluvia recibida.



**Fig. 1.** Exceso de lluvia producido según Green y Ampt ( $\theta_0 = 0.25 \theta_b$ )

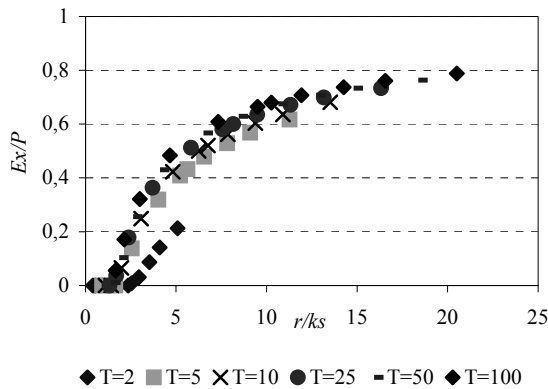


Fig. 2. Exceso de lluvia producido según Green y Ampt ( $\theta_0 = 0.5 \theta_r$ )

Si el objeto del estudio no es sólo el balance de agua en el sistema, sino, por ejemplo, cuantificar el riesgo de pérdida de suelo, poder localizar zonas donde la probabilidad de generación de escorrentía es mayor permite concentrar las alternativas de protección o de manejo. Más evidente resulta la utilidad de disponer de los valores locales si hablamos del transporte de sustancias a través del suelo: aquellos puntos donde la altura de agua infiltrada sea mayor constituyen las vías de entrada de contaminantes a aguas subterráneas, y los errores cometidos al cuantificar dicho aporte, en el caso de herbicidas, por ejemplo, utilizando valores globales quedan patentes.

#### 4. Conclusiones

La conductividad hidráulica saturada en la parcela ha variado según su localización en la ladera y según su posición con respecto al árbol, presentando las zonas aguas abajo en general mayores valores medidos en campo. Las consecuencias sobre el balance de agua en cada caso son mayores en el caso de lluvias de baja intensidad/mayor frecuencia. La obtención de la relación adimensional entre la fracción de lluvia que constituirá la escorrentía y el valor relativo de la intensidad de lluvia frente a  $k_s$  permite evaluar a priori la conveniencia o no de distribuir los cálculos a la hora de realizar el balance de agua en la superficie del suelo. La asignación de probabilidades a los resultados permite, en aplicaciones derivadas del modelo hidrológico, clasificar espacialmente la zona en cuanto a los riesgos asociados (por ejemplo, de pérdida de suelo o de contaminación de aguas subterráneas).

*Agradecimientos.* Este trabajo se ha llevado a cabo dentro del proyecto CAO001-01-C4-4, *Minimización de la contaminación por fitosanitarios bajo diferentes sistemas de manejo de suelo en cultivo de olivar*, financiado por la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.

#### Referencias

- Bras, R. 1990. Hydrology. An Introduction to Hydrologic Science. Cap. 7 y 8. Addison-Wesley. Reading
- De Haro, J.M., Vanderlinden, K., Gómez, J.A., Giráldez, J.V. 1999. Medida de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el infiltrómetro de Philip-Dunne: Aplicabilidad y usos. En: *Progresos en la investigación en zona no saturada*, pp. 9-20. Huelva.
- De Luna, E. 1994. Protección del suelo contra la erosión en el cultivo del olivo. Tesis doctoral. Dpto. Agronomía, Universidad de Córdoba.
- García-Marín, A.P. 2000. Análisis regional de las precipitaciones máximas en Andalucía. Estimación de las relaciones IDF. Trabajo Profesional Fin de Carrera, Dpto. Ing. Rural, Universidad de Córdoba.
- García-Sinovas, D., Regalado, C., Muñoz-Carpena, R., Álvarez-Benedí, J. 2001. Comparación de los permeámetros de Guelph y Philip-Dunne para la estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo. En: *Temas de Investigación en Zona no Saturada*, J.J. López, M. Quemada (eds.), pp.31-36. Pamplona.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego.
- Lee, D.M., Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Clothier, B.E. 1985. A comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Can. J. Soil Sci.* 65: 563-573.
- Mohanty, B.P., Kanwar, R.S., Everts, C.J. 1994. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. *Soil, Sci. Soc. Am. J.* 58: 672-677.
- Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Álvarez-Benedí, J., Bartolí, F. 2002. Field evaluation of the new Philip-Dunne permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci.* 167:
- Paige, G.B., Hillel, D. 1993. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. *Soil Sci.* 155:175-189.
- Pastor, M., Humanes, M.D., Vega, V., Castro, J. 1998. Diseño y manejo de plantaciones de olivar. Monografías 22/98. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Philip, J.R. 1993. Approximate analysis of the borehole permeameter. *Water Resour. Res.* 29:3763-3768.
- Vanderlinden, K., Gabriels, D., Giráldez, J.V. 1998. Evaluation of infiltration measurements under olive trees in Córdoba. *Soil Tillage Res.* 48: 303-315.
- Warrick, A.W., Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: *Applications of soil physics*, D. Hillel (ed.), pp. 319-344. Academic Press. Nueva York.

