

# COMPARACION DE DOS METODOS DE CAMPO PARA LA DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA EN SUELOS DEL SINU (CORDOBA, COLOMBIA).

## COMPARISON OF TWO FIELD METHODS FOR MEASURING SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN THE MID SINU VALLEY SOILS (CORDOBA, COLOMBIA).

Bernardo Prieto<sup>1</sup>, Ricardo E. Támara<sup>1</sup>, José A. Peroza<sup>1</sup>

Recibido para evaluación: Julio 19 de 2006 - Aceptado para publicación: Octubre 17 de 2006

### RESUMEN

El presente estudio fue realizado con el objetivo de evaluar el desempeño de la metodología del infiltrómetro de tensión de disco, comparado con el infiltrómetro de anillos para determinar conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) en suelos del Sinú. Se seleccionaron dos suelos: un Endoacuept arcilloso localizado en la Granja de la Universidad de Córdoba y un Haplustepts arenoso ubicado en el corregimiento de Jaraquiel (Montería). En cada localidad se realizaron pruebas de infiltración simultáneas con ambos métodos hasta alcanzar la infiltración estacionaria para luego calcular los correspondientes valores de  $K_s$ . Los valores de  $K_s$  obtenidos con infiltrómetro de anillos fueron significativamente mayores a los conseguidos con el infiltrómetro de tensión de disco, debido probablemente a las diferencias en la profundidad de instalación de los equipos y la relativa mayor área cubierta por el infiltrómetro de anillos. En el suelo arcilloso los valores de  $K_s$  medidos con el infiltrómetro de anillos estuvieron en el rango de 1.29 a 6.02  $\text{cm h}^{-1}$  y los medidos con el infiltrómetro de tensión de disco entre 0.74 y 2.64  $\text{cm h}^{-1}$ . En el suelo arenoso fueron de 4.25 a 24.15  $\text{cm h}^{-1}$  con el infiltrómetro de anillos y de 2.23 a 7.87  $\text{cm h}^{-1}$  con infiltrómetro de tensión de disco. El coeficiente de variación con el infiltrómetro de anillos fue del 47% y 52% en el suelo arcilloso y arenoso, respectivamente; mientras que con el infiltrómetro de tensión de disco se mantuvo en el 37% en los dos suelos. El método infiltrómetro de tensión de disco resulta ser más práctico por su facilidad, el tiempo, el número de operarios, el consumo de agua, el costo y menor variabilidad.

**Palabras claves:** Conductividad hidráulica, Infiltrómetro de tensión de disco, Infiltrómetro de anillo.

---

<sup>1</sup>Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería Agronómica y Desarrollo Rural, Carrera 6 No. 76-103, Montería, Colombia, Telefax: (4) 786 0255, E-mail: bprieto@sinu.unicordoba.edu.co.

## ABSTRACT

The performance of the tension disc infiltrometer methodology was compared with the ring infiltrometer traditional technique to measure saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), in Sinú soils. Two soils were chosen: a clay Endoaquept soil located in the University of Cordoba experimental field and a sandy Haplustepts located in village of Jaraquiel (Montería). Simultaneous infiltration tests were performed in each location until a steady state flow for each was reached followed by calculation of the corresponding  $K_s$  values. The  $K_s$  values obtained using ring infiltrometer were significantly greater than the ones obtained using disc infiltrometer as a result probably of the differences in depth of the equipment installation and the relative greater area covered by the ring infiltrometer. In clay soil the  $K_s$  values obtained with ring infiltrometer were in the range of 1.29 to 6.02  $\text{cm h}^{-1}$ , while 0.74 to 2.64  $\text{cm h}^{-1}$  were obtained with disc infiltrometer. In sandy soil  $K_s$  values were 4.25 to 24.15  $\text{cm h}^{-1}$  with I A and 2.23 to 7.87  $\text{cm h}^{-1}$  with disc infiltrometer. Cv values in ring infiltrometer were 47% and 52% in clay and sandy soils respectively, whereas with disc infiltrometer method a 37% was obtained for both soils. disc infiltrometer method turns out to be more practical considering the easiness, time, labor, water consumption and costs. Additionally, presents low variability.

**Keys words:** Hydraulic conductivity, Tension disc infiltrometer, Ring infiltrometer.

## INTRODUCCION

La obtención de las propiedades hidráulicas representativas del suelo, en condiciones de campo, es un paso importante en el entendimiento de la dinámica del proceso de movimiento de agua y solutos en el suelo. Además, es de gran utilidad en el estudio de drenaje y riego, procesos erosivos y contaminación del suelo. Varios métodos han sido desarrollados para medir "in situ" conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), estos métodos incluyen: El infiltrómetro de doble anillo (Bouwer, 1986), el método del pozo barrenado (Van Beers, 1970), el permeámetro de Guelph (Reynolds *et al.*, 1983), el simulador de lluvia, del cual existen varios tipos entre ellos el desarrollado por la Universidad de Guelph (Tossell *et al.*, 1987), el permeámetro de velocidad (Merva, 1987), y la técnica de los anillos gemelos (Scotter *et al.*, 1982). El infiltrómetro de tensión de disco (Perroux y White, 1988) es un método relativamente nuevo para determinar en campo conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) y no saturada próxima a saturación ( $K_h$ ). Esta técnica ha ganado popularidad, por su simplicidad, por la rapidez con que las mediciones se pueden hacer y por que no

altera de forma significativa la superficie del suelo al inicio de las mediciones (White y Sully, 1987; White y Perroux, 1989; Smetten y Clothier, 1989; Moreno *et al.*, 1993).

Varios investigadores han adelantado trabajos de comparación entre estos métodos. Dorsey *et al.* (1990) compararon cuatro métodos; permeámetro de Guelph, permeámetro de velocidad, procedimiento de prueba de bombeo y el de pozo barrenado para medir la  $K_s$  de dos suelos, encontrando que todos los métodos mostraron una amplia variabilidad en la medida de la conductividad hidráulica saturada. El método del pozo barrenado, el del permeámetro de velocidad y el del procedimiento de bombeo proporcionaron valores dentro de rangos similares, mientras que el método del permeámetro de Guelph proporcionó valores significativamente más bajos. Anotan además que fue difícil comparar los resultados obtenidos con las cuatro técnicas por cuanto ellas exploran diferentes volúmenes de suelo durante las mediciones. Gupta *et al.* (1993) condujeron un estudio similar en Ottawa (Canadá) para comparar los valores de la conductividad hidráulica saturada medida con infiltrómetro de doble anillo, simulador

de lluvia, permeámetro de Guelph e infiltrómetro de Guelph, encontrando que los valores obtenidos con el infiltrómetro de anillo y el permeámetro de Guelph fueron iguales pero significativamente más bajos que los valores determinados por el simulador de lluvia y el infiltrómetro de Guelph. Los métodos de permeámetro de Guelph e infiltrómetro de Guelph tuvieron mucha variabilidad requiriendo de gran número de mediciones. Las diferencias fueron probablemente debidas a la diferencia de profundidad en la instalación de los equipos y a la relativa mayor área explorada en el caso del simulador de lluvia. En Córdoba (España) Gómez *et al.* (2001) comparando cuatro técnicas para analizar la infiltración y la escorrentía en un huerto de olivares, utilizaron el simulador de lluvia, los anillos de tensión, los infiltrómetros de tensión y otra metodología. Encontraron que los datos de la Ks determinados con el simulador de lluvia y los infiltrómetros de tensión fueron significativamente más altos que los de las otras técnicas utilizadas. Torrente *et al.* (2003) compararon varios métodos para determinar Ks en suelos magnésicos del Valle del Cauca (Colombia) utilizando el método de infiltrómetro de anillos y la botella de goteo para medir Ks en la superficie, y el permeámetro de Guelph y el pozo barrenado para hacer las medidas en profundidad. Encontraron que para determinar Ks en la superficie cualquiera de los dos métodos es indistintamente satisfactorio.

Los reportes anteriores indican que la mayoría de estos trabajos se han llevado a cabo en Norteamérica, Europa y Australia y muy pocos en Colombia mientras que trabajos de comparación entre el método del infiltrómetro de anillos y el infiltrómetro de tensión no se han realizado; igualmente, en Colombia, no se reportan trabajos en los que se haya utilizado el infiltrómetro de tensión. Teniendo en cuenta lo anterior y la necesidad de ofrecer a los técnicos e investigadores en el área de la agronomía, la ingeniería agrícola, la ingeniería civil y las ciencias

medioambientales alternativas más sencillas y prácticas para la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo, se plantea el presente estudio que tiene por objetivo hacer una evaluación comparativa del comportamiento de la técnica del infiltrómetro de tensión de disco frente a la técnica tradicional del infiltrómetro de anillos concéntricos para medir infiltración y Ks en la superficie del suelo, en suelos del Sinú.

## MATERIALES Y METODOS

### Localización y descripción del sitio de los experimentos

Las pruebas se realizaron en dos suelos de texturas diferentes. El suelo arcilloso fue localizado dentro de la granja de riego de la Universidad de Córdoba, este suelo clasificado como Endoacuept (USDA, 1999) tiene un 43.9% de arcilla, 41.2% de limo y 14.9% de arena, muestra fenómenos de expansión y contracción según los contenidos de agua, no ha sido intervenido en los últimos 4 años, pero se ha aplicado riego por microaspersión todos los años. El suelo arenoso corresponde a un Haplustepts (USDA, 1999) con un contenido de arena de 81.54% de arena, 15.28% de limo y 3.17% de arcilla, se ubicó en la vía a Jaraquiel en el pie de la Sierra Chiquita unos 5 km al sur de Montería.

### Equipos

**Infiltrómetros de tensión de disco:** Los infiltrómetros utilizados en este trabajo se construyeron, siguiendo el diseño básico de Perroux y White (1988). El aparato (Figura 1) está construido en metacrilato y dispone de una base circular de 12.5 cm de radio que está cubierta en su parte inferior por una malla permeable de nylon de 20 mm. En la parte superior del disco, que sirve de base, se roscan un cilindro y un Mariotte. El primero es el recipiente de alimentación del agua que se infiltra en el suelo y lleva una escala graduada que permite leer la cantidad

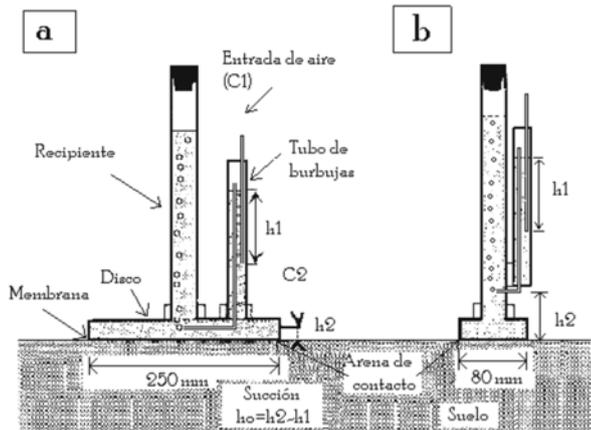


Figura 1. Infiltrómetros de Tensión (Ankeny *et al.*, 1991).

de agua infiltrada (cm) en función del tiempo. El Mariotte consta también de un cilindro con agua que se comunica con el exterior a través de un tubo móvil llamado tubo de burbujas, el cual dispone de una entrada de aire (C1) que se usa para fijar el potencial de agua, para lo cual, basta con ajustar la longitud ( $h_1$ ) del tubo de burbujas que se sumerge en el agua que contiene el Mariotte, leyendo esta longitud en una escala graduada. El potencial real del agua ( $h_0$ ), medido en cm de columna de agua, corresponderá a la suma algébrica de la longitud  $h_1$  y la longitud  $h_2$ . Esta última es la distancia existente entre la membrana de nylon y el tubo horizontal del capilar. Por tanto,  $h_0 = h_2 - h_1$ , y para todo  $h_1 > h_2$ ,  $h_0$  será negativo (tensión). Las tasas de infiltración leídas en la escala son luego convertidas en tasa de infiltración con referencia al área de la base del infiltrómetro pues es el área real de infiltración.

**Infiltrómetro de anillos concéntricos:** Los anillos infiltrómetros consisten de un juego de dos anillos de 30 cm de alto. El exterior de 45 cm de diámetro y el interior de 20 cm de diámetro; una boya con una escala graduada en cm y mm para realizar las mediciones. La profundidad a la que penetran los anillos es de 15 cm.

**Pruebas de infiltración en campo:** En cada localidad, la estructura del experimento

quedó conformada por un área de terreno de aproximadamente 0.5 ha sobre la cual se realizaron, al azar, doce pruebas de infiltración con cada una de las metodologías, de manera simultánea y hasta lograr el flujo estacionario. En el caso de los infiltrómetros de tensión, se tomaron datos a 4 potenciales: -10, -5, -2 y 0 cm de columna de agua. Iniciando por el potencial más bajo, las pruebas de infiltración se llevaron hasta alcanzar el flujo estacionario o cuasi estacionario en todos los potenciales y sin mover el equipo de su emplazamiento. La prueba de infiltración terminaba con el potencial de saturación (0 cm). Cook y Broeren (1994) sugieren que los potenciales se establezcan en orden ascendente terminando siempre con el potencial de saturación al objeto de reducir los efectos de histéresis. Los infiltrómetros de anillos se insertaron en el suelo a una profundidad de 15 cm, se llenó con agua tanto el anillo interior como el exterior para proceder a medir las tasas de infiltración.

### Análisis de los datos

Con los datos obtenidos en el campo se calculó la  $K_s$  utilizando las ecuaciones desarrolladas para cada método.

**Infiltrómetros de tensión de disco:** Wooding (1968) propuso una ecuación para el flujo estacionario de la infiltración  $q_\infty$  ( $LT^{-1}$ ) que procede de una fuente circular de radio  $r$  (L) en la superficie del suelo viene dado aproximadamente por:

$$q_\infty = K + \frac{4\phi}{\pi r} \quad (1)$$

donde  $\phi$  es el potencial del flujo mátrico definido como:

$$\phi = \int_{h_n}^{h_0} K(h)dh \quad (2)$$

Ankeny *et al.* (1991) propusieron una solución simultánea a la ecuación de Wooding (1968) basada en las observaciones de la tasa de infiltración ( $q$ ) en régimen estacionario a dos potenciales ( ) diferentes. Este método Multipotencial (Ankeny *et al.*, 1991) fue el empleado en este trabajo y se seleccionó por ser un método simple y porque no proporciona valores negativos de conductividad hidráulica (Logsdon y Jaynes, 1993)

**Infiltrómetro de anillos:** Los resultados obtenidos en el campo se pueden analizar utilizando diferentes modelos, en este caso, el modelo utilizado fue el de Kostiaikov (1932), que consiste en describir la infiltración del agua en el suelo con un modelo potencial ( $I_a = at^b$ ), para obtener de esta manera los modelos de infiltración acumulada, velocidad de infiltración e infiltración básica. Se asumió que la infiltración básica así obtenida equivale a la  $K_s$  según lo establecido por Green y Ampt (1911) y analizado por Fuentes (1997). El estadístico utilizado para la comparación de las medias fue la prueba de  $t$  para muestras de igual tamaño considerado varianzas desiguales.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Para hacer la comparación de los resultados obtenidos con las dos metodologías, del grupo de datos, tomados con el infiltrómetro de tensión solamente se utilizaron los datos logrados a potencial de saturación (0 cm), tal como lo hicieran Gómez *et al.* (2001).

### Localidad uno (Granja de Riego de la Universidad de Córdoba)

Un resumen analítico de algunos parámetros estadísticos que permiten comparar los resultados de  $K_s$  medidos en la superficie del suelo arcilloso con los dos métodos, se presenta en la tabla 1. Se puede observar que los valores de  $K_s$  obtenidos con el infiltrómetro de anillo son mayores que los medidos con el infiltrómetro de tensión, llegando a ser el doble, en este caso.

De acuerdo a lo indicado por Dorsey *et al.* (1990) y Gupta *et al.* (1993), en vista de la amplia variabilidad espacial y también a que los valores de  $K_s$  tienden a tener una distribución log-normal, se incluye la media geométrica para indicar la tendencia central. Se puede apreciar que entre estas medias las diferencias son menores. El rango, es mayor en los valores obtenidos con el infiltrómetro de anillo. En el mismo sentido el coeficiente de variación fue del 47% comparado con 37% calculado para los datos tomados con el infiltrómetro de tensión. La prueba de  $t$  realizada para la comparación de las medias con varianzas desiguales mostró diferencias significativas con un nivel de significación del 5%. Estos resultados pueden tener algunas explicaciones: en primer lugar, el infiltrómetro de anillo es insertado en el suelo a una profundidad de 15 cm, mientras que el infiltrómetro de tensión tiene una localización completamente superficial. Esta diferencia puede conducir a que se esté midiendo la  $K_s$  de capas u horizontes diferentes en el suelo, aspecto que se aprecia con claridad al medir la profundidad del frente de humedecimiento el cual fue sustancialmente mayor en las pruebas

**Tabla 1.** Comparación de la conductividad hidráulica  $K_s$  ( $\text{cm h}^{-1}$ ) determinados con los dos métodos en el suelo arcilloso de la Universidad de Córdoba (Montería, Colombia).

Método	n	Medida aritmética	Medida geométrica	Rango	Desviación Standard	Coficiente de variación (%)
Infiltrómetro de anillo	9	3.66	2.95	1.29 - 6.02	1.71	47
Infiltrómetro de tensión	9	1.59	1.74	0.74 - 2.64	0.59	37

realizadas con el infiltrómetro de anillo. La inserción de los anillos produce, además, algún grado de alteración de la capa superficial del suelo. Otro factor que se debe considerar es la relativa mayor área superficial cubierta ( $0.16 \text{ m}^2$  en el infiltrómetro de anillo contra  $0.049 \text{ m}^2$  en el infiltrómetro de tensión, una mayor área conduce a una mayor heterogeneidad en cuanto a porosidad, humedad, raíces de plantas y a que el efecto del agrietamiento se manifiesta con mayor intensidad lo que conduce a valores de  $K_s$  mayores; este fenómeno fue observado también por Moreno *et al.* (1993).

La  $K_s$  determinada con infiltrómetro de anillo está basada en una solución analítica para flujo unidimensional mientras que la ecuación desarrollada para el infiltrómetro de tensión esta basada en una solución para el flujo tridimensional, bajo condiciones de campo el flujo de agua en el suelo es a menudo multidimensional. La conductividad hidráulica es una de las propiedades que presenta mayor variabilidad, no obstante, el CV obtenido del 47% es muy similar al encontrado por Gupta *et al.* (1993) trabajando la misma metodología, el cual fue de 49.6%.

### Localidad dos (Suelo arenoso de Jaraquiel, municipio de Montería, Córdoba)

Las dos metodologías mostraron un comportamiento similar al encontrado en el suelo arcilloso. Los mayores valores de  $K_s$  fueron obtenidos con el método de infiltrómetro de anillo, y de igual manera que

en el caso anterior resultaron ser significativos a la hora de realizar la prueba de  $t$  para igualdad de medias, con un nivel de significación del 5%. Sin embargo, según los datos de la tabla 2 se puede ver que el coeficiente de variación fue ligeramente mayor para el infiltrómetro de anillo (52%), mientras que se mantuvo el mismo valor (37%) para el infiltrómetro de tensión. Este último valor es similar, pero menor al encontrado por Vanderlinden *et al.* (1998) que fue del 41% trabajando con la misma metodología en suelos de Córdoba (España).

En general se puede afirmar que la  $K_s$  superficial en el suelo arenoso fue mayor que en el suelo arcilloso la cual se puede clasificar como moderadamente rápida a rápida, según Soil Survey Staff (1981), mientras que la del suelo arcilloso se clasifica como moderadamente lenta a moderada.

Aunque no existe un parámetro para evaluar la precisión de las mediciones se puede inferir, de acuerdo con lo observado en el campo, que algunos valores como  $24.15 \text{ cm h}^{-1}$  obtenido con el infiltrómetro de anillo en el suelo arenoso pueden considerarse como muy alto y los valores entre  $2.23$  y  $7.87 \text{ cm h}^{-1}$  obtenidos con el infiltrómetro de tensión, en el mismo suelo, se muestran más ajustados a la realidad.

Considerando lo anotado por varios autores (Vanderlinden *et al.*, 1998; Dorsey *et al.*, 1993; Torrente *et al.*, 2003), la comparación de métodos debe tener en cuenta otros aspectos tales como tiempo, facilidad de aplicación, simplicidad, cantidad de agua utilizada, mano de obra y costo. En atención

**Tabla 2.** Comparación de la conductividad hidráulica  $K_s$  ( $\text{cm h}^{-1}$ ) determinados con los dos métodos en el suelo arenoso de Jaraquiel (Montería, Colombia).

Método	n	Medida aritmética	Medida geométrica	Rango	Desviación Standard	Coefficiente de variación (%)
Infiltrómetro de Anillo	9	13.99	12.91	4.35 – 24.15	7.29	52
Infiltrómetro de Tensión	9	5.25	6.64	2.23 – 7.87	1.93	37

a lo anterior, en la tabla 3 se presentan algunos de estos aspectos. Se puede ver que el tiempo necesario para realizar una prueba de infiltración completa con el infiltrómetro de tensión es casi la mitad del necesario para realizar la misma con el infiltrómetro de anillo; además, solo requiere de un operario que con buena destreza puede conducir dos pruebas al tiempo y la cantidad de agua que se requiere es considerablemente menor.

La menor variabilidad que presenta el método de infiltrómetro de tensión, sugiere que se tenga que hacer menor número de pruebas para llegar a resultados representativos de un área de terreno. Si a lo anterior se le suma el menor tiempo que demora realizar cada prueba, el bajo consumo de agua y el número

de operarios, se puede concluir que este método resulta más práctico, y menos costoso que el método de infiltrómetro de anillo. Esto concuerda con lo anotado por White y Sully (1987), White y Perroux (1989), Smetten y Clothier (1989), Moreno *et al.*, (1993), Gómez *et al.*, (2001), cuando afirman que los infiltrómetros de tensión permiten caracterizar fácilmente las propiedades hidráulicas de los suelos "in situ", en condiciones de saturación y próximas a saturación. Esta técnica también permite caracterizar los cambios temporales en las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo y los valores obtenidos con estas mediciones pueden ser utilizados en modelos para predecir la tendencia de la infiltración y movimiento del agua en el suelo.

**Tabla 3.** Otros parámetros de comparación entre los métodos de infiltrómetro de anillo e infiltrómetro de tensión en suelos del Valle del Sinú Medio (Montería, Colombia).

Método	Tiempo (minutos)	Operarios	Consumo de agua (L)
Infiltrómetro de Anillo	170	2	350
Infiltrómetro de Tensión	90	1	30

## CONCLUSIONES

- Para el estudio y sitios seleccionados, los valores de conductividad hidráulica (Ks) obtenidos con infiltrómetro de anillo fueron significativamente mayores a los conseguidos con el infiltrómetro de tensión. Estas diferencias fueron probablemente debidas a las diferencias en la profundidad de instalación de los equipos y la relativa mayor área cubierta por el infiltrómetro de anillo.
- La menor variabilidad mostrada por el Infiltrómetro de Tensión indica que con menor número de pruebas se llega a resultados representativos de un área de

terreno. Además, las pruebas se realizan en menor tiempo y con menor número de operarios, por lo que se puede concluir que este método resulta más práctico, y menos costoso que el método de infiltrómetro de anillo, los datos obtenidos pueden ser utilizados en modelos para predecir el movimiento del agua y solutos en el suelo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan sus agradecimientos a los profesores Juana Robles y Carlos Cardona Ayala, por sus aportes en el análisis estadístico.

## BIBLIOGRAFIA

- Ankeny, M.; Ahumed, M.; Kaspar, T. y Horton, R. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society American Journal* 55:467-470
- Bouwer, H., 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Monograph No 9, Madison, p825-844
- Cook, F. y Broeren, A. 1994. Six methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disc permeameters. *Soil Science* 157:2-11
- Dorsey, D.; Ward, A.; Fausey, N. y Bair, E. 1990. A comparison of four field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE* 33:1925-1931
- Fuente, C. 1997. Caracterización mínima del suelo con fines de riego. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Departamento de Irrigación Uach, México, D.F., p1-9
- Gómez, J.; Giráldez, J. y Fereres, E. 2001. Analysis of infiltration and runoff in an olive orchard under no-till. *Soil Science Society American Journal* 65:291-299
- Gupta, R.; Rudra, R.; Dickinson, N.; Patín, N. y Wall, G. 1993. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. *Transactions of the ASAE* 36:51-55
- Green, W. y Ampt, G. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soil. *Journal of Agricultural Sciences* 4:1-24
- Kostiakov, A. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and necessity for studying it from a dynamic view for purposes of amelioration. *International Committee Society of Soil Science* 61th A:17-21
- Logsdon, S. y Jaynes, D. 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Science Society American Journal* 57:1426-1431
- Merva, G. 1987. The velocity permeameter technique for rapid determination of the hydraulic conductivity in situ. *Proceedings of 3<sup>rd</sup> Workshop on Land Drainage*, Ohio State University.
- Moreno, F.; Andreu, L.; Fernández, J. y Cayuela, J. 1993. Medida in situ de las propiedades hidráulicas del suelo. *Riegos y Drenajes* 21:14-18
- Perroux, K. y White, I. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society American Journal* 52:1205-1215
- Reynolds, W.; Elrick, D. y Topp, G. 1983. A re-examination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science* 136 (4):250-268
- Scotter, D.; Clothier, B.; Harper, E. 1982. Measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity using twin rings. *Australian Journal of Soil Research* 20:295-304
- Smettem, K. y Clothier, B. 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multi-disc permeameters. *Journal Soil Science* 40:563-568

- Soil Survey Staff. 1981. Soil Survey Handbook 18. USDA, Washington, D.C. 503p
- USDA. 1999. Natural Resources Conservation Service. Soil Taxonomy. USDA, <http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy/> [Accedido: 04-15-2006]
- Torrente, A.; Becerra, C.; Barney, F.; Garcia, A.; Escobar, Ch. y Amezquita, E. 2003. Evaluación de métodos de conductividad hidráulica saturada en suelos magnésicos del Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 33(2):140-143
- Tossell, R.; Dicfinson, W.; Rudra, R. y Wall, G. 1987. A portable rainfall simulator. Canadian Agricultural Engineer 29:155-162
- Van Brees, W. 1970. The auger hole method. Bulletin 1. International Institute of Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 32p
- Vanderlinden, K.; Gabriels, D. y Giráldez, J. 1998. Evaluation of infiltration measurements under olive trees in Córdoba. Soil Tillage Resources 48:303-315
- White, I. y Perroux, K. 1989. Estimation of unsaturated hydraulic conductivity from field sorptivity measurements. Soil Science Society American Journal 53:324-329
- White, I. y Sully, M. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. Water Resources Research 23:1514-1522
- Wooding, R. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resources Research 4:1259-1273