

DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE UN SUELO, UTILIZANDO EL METODO DEL FLUJO DE AIRE CALIENTE

Celio I. Chagas (1), Raúl. A. Díaz, (2), Luis A. Sleiman, (2), Oscar J. Santanatoglia (1,2)

Facultad de Agronomía - UBA -
Av. San Martín 4453 - 1417 - Buenos Aires

RESUMEN

Se aplicó el método del flujo de aire caliente (HAM), a muestras del horizonte All de un suelo de pradera perteneciente a la Serie Ramallo (Argiudol vértico). Se estudió el cumplimiento de las condiciones necesarias para la aplicación de la ecuación que permite obtener los valores de difusividad del agua edáfica a partir de diferentes contenidos hídricos del suelo.

Para evitar el problema del manipuleo de datos citado en la literatura, se procedió a utilizar ajustes matemáticos con alto R^2 , (logarítmicos y potenciales) y se compararon con el ajuste manual. El uso indistinto de los tres métodos permitió arribar a resultados similares, presentando el ajuste logarítmico, la menor variabilidad.

Se determinó el número necesario de muestras para lograr un grado de precisión establecido.

La curva de conductividad hidráulica obtenida a partir de los valores de difusividad del agua en el suelo y la retención hídrica, se comparó con las correspondientes a suelos con menor contenido de arcilla. Se pudo comprobar que el movimiento de agua en este suelo es bajo, respecto de los restantes, cuando el contenido hídrico es alto, invirtiéndose esta relación con bajos contenidos de agua.

Palabras claves: conductividad hidráulica, difusividad, método del aire caliente.

SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY MEASUREMENT USING THE HOT AIR METHOD

ABSTRACT

The Hot Air Method (HAM) was applied to soil samples from the All horizon of a prairie soil (Ramallo Series - vertic Argiudoll).

The conditions needed to apply the equation for obtaining diffusivity values in relation to different soil moisture contents were studied.

Data manipulation problems like those cited in the literature, were avoided by using mathematical fitting methods (logarithmic and exponential). The use of either methods (mathematical fitting or fitting by hand), yielded similar results. The logarithmic fitting method showed the smallest variability. The required number of samples for obtaining a desired precision degree is determined.

The hydraulic conductivity curve, obtained through diffusivity values and the moisture characteristic curve, was compared to lesser clay content soil curves.

Water movement in this soil is slow, in relation to the others, when moisture content is high an opposite relation is obtained when moisture content values are low.

Key words: Hydraulic conductivity, diffusivity, hot air method.

(1) Cátedra de Manejo y Conservación de suelos.

(2) Centro de Radiobiología.

INTRODUCCION

Para predecir la magnitud y dirección del flujo del agua en el suelo, es necesario conocer los valores de la conductividad hidráulica no saturada en relación a los diferentes estados de humedad edáfica. Esto es necesario, pues la mayor parte de los procesos que se relacionan con el movimiento del agua en la zona de exploración radical, ocurren en condiciones de insaturación (Hillel, 1970). Para ello diversos investigadores han desarrollado métodos de campo (Bouma et al, 1971; Topp y Binns, 1976; Nielsen y Davidson, 1964) y de laboratorio. Respecto de estos últimos se puede mencionar el "método del flujo de salida en un paso" (One step outflow) (Passioura, 1976; Jaynes y Tayler, 1980). Otro método de laboratorio es el denominado "del aire caliente" (Hot air method), el cuál, al igual que el anterior, permite determinar valores de difusividad. Los datos así obtenidos pueden transformarse en valores de conductividad hidráulica no saturada, utilizando la curva característica de humedad del suelo estudiado.

Este método fue desarrollado por Arya et al, (1975) en base al trabajo de Bruce y Klute (1956), siendo posteriormente utilizado por Ehlers (1976, 1977).

El objetivo de este trabajo consistió en obtener valores de conductividad hidráulica no saturada para el horizonte All de la serie Ramallo. Su conocimiento resulta imprescindible en la caracterización hídrica del perfil, teniendo en cuenta además que el mismo posee un horizonte B2t con alto contenido de arcilla (56%), que reduce la velocidad descendente del agua. Para tal fin se procedió a la adaptación del método del flujo de aire caliente, introduciéndole cambios que mejoren su confiabilidad.

MATERIALES Y METODOS

Se trabajó sobre el horizonte All de un suelo no erosionado de la Serie Ramallo (Argiudol vértico), correspondiente a un campo natural de más de 30 años. Los parámetros analíticos de este horizonte se observan en la tabla 1. En la figura 1 se presenta la curva característica de humedad, correspondiente a esta situación. Para obtener los valores de difusividad del agua en el suelo, se procedió a adaptar el método de flujo de aire caliente. El mismo consiste en provocar el desecamiento de la superficie de una muestra

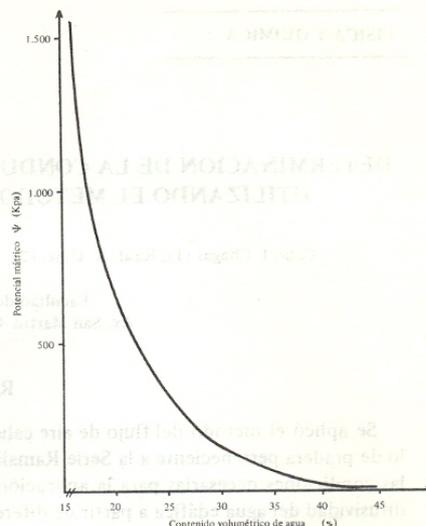


Figura 1: Curva característica del contenido de agua en el suelo, para el horizonte Ap de la serie Ramallo, bajo situación de pradera. (*)

(*) Rébora, G. y Fernández, N.R. (1987). Comunicación personal.

Tabla 1:

Características y propiedades del horizonte All de la serie Ramallo, bajo Campo Natural (+)

Profundidad: 0-13 cm
Textura: Franco arcilloso limoso
% arcilla: 28.9
% limo: 66.4
% arena: 4.7

Estructura Tipo: granular
Clase: fino
Grado: fuerte

Consistencia en seco: ligeramente dura; en húmedo: friable
Humedad equivalente: 28.6%
Densidad aparente: 1.22 (g.cm⁻³)
Porosidad total: 53%
Conductividad hidráulica saturada: 0.59 cm.h⁻¹
Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados: 0.38 mm.
Diámetro medio ponderado del suelo seco: 4.69 mm
Contenido de materia orgánica: 4.13%
Contenido de gomas microbianas: 0.81 (mg. g⁻¹).

(+) Chagas, C.; Santanatoglia, O.J. y Gutiérrez, R. (1988). Propiedades físicas y biológicas de un Argiudol vértico erosionado y bajo pradera. Trabajo inédito.

de suelo sin disturbar que se encuentra alojada en pequeños cilindros de metal. Esto se logra mediante un flujo de aire caliente dirigido en forma vertical, sobre el extremo abierto del cilindro. Se parte del supuesto de que existen condiciones de isotermita durante el tiempo que dura el desecamiento. El análisis matemático de la curva de contenido de agua en el suelo en función de la distancia a la superficie evaporante, permite obtener los valores de difusividad en función del agua del suelo.

La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$D(\theta) = \frac{1}{2t} \left(\frac{\delta x}{\delta \theta} \right)_{\theta_x} \int_{\theta_x}^{\theta_i} \chi \delta \theta \quad (1)$$

Las condiciones iniciales y de contorno son:

$$\theta = \theta_i \quad x > 0 \quad t = 0$$

$$\theta = \theta_o \quad x = 0 \quad t > 0$$

Siendo:

t = duración en minutos del flujo de aire caliente sobre la superficie de la muestra.

$\left(\frac{\delta x}{\delta \theta} \right)_{\theta_x}$ = derivada de la curva "distancia a la superficie evaporante (χ) - Contenido de agua en el suelo (θ)", para un contenido de humedad determinado (θ_x).

$\int_{\theta_x}^{\theta_i} \chi \delta \theta$ = integral definida de la curva anterior entre el

contenido inicial de agua de la muestra y un contenido de humedad determinado.

θ_o = contenido de humedad del suelo seco al aire.

Deben satisfacerse previamente dos condiciones:

1 - La evaporación acumulada del suelo contenido en el cilindro, debe ser proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, manteniendo una relación de linealidad.

2 - El extremo opuesto a la superficie evaporante del cilindro debe conservar el contenido de agua inicial de la muestra (θ_i) para simular una columna semi-infinita. El mismo debe permanecer sellado.

Para la obtención de los datos experimentales se utilizaron 25 cilindros de hierro galvanizado de 5,9 cm de largo, 4,2 cm de diámetro interior y 0,2 cm de espesor, cuya superficie interior fue pulida; uno de los extremos se biseló para poder introducirlo en el suelo. Una vez obtenidas las muestras se procedió a saturar los cilindros colocando los mismos en forma vertical sobre una malla de alambre y dejándolos embeber por capilaridad durante 48 horas; luego fueron dejados drenar libremente en recipientes plásticos cerrados, durante una semana para llegar a un equilibrio. Los mismos fueron sometidas luego a un flujo de aire caliente de 100° C de temperatura. Este se consiguió provocando el paso de una corriente de aire generada por un ventilador, a través de un embudo adosado a un caño de hierro galvanizado de 50 cm de largo, el cual calentado por medio de tres mecheros de gas. Dicho caño poseía un diámetro interior de 4,2 cm con un codo adosado al extremo de salida, para generar el flujo vertical descendente requerido. Las muestras se colocaron a 5 cm de la boca de salida, donde se controló la temperatura con un termómetro.

Se les aplicó aire caliente a los cilindros durante un período de 21 minutos. Este tiempo surgió experimentalmente a partir de comprobar previamente con un grupo de 10 cilindros, que se cumplían las condiciones 1 y 2 citadas. Luego de finalizado el paso anterior, cada cilindro de suelo fue cortado en numerosas secciones de aproximadamente 2 mm de espesor, utilizando para ello un émbolo especialmente construido para tal fin. Estas secciones fueron rápidamente pesadas en húmedo y luego puestas a secar a fin de determinar su contenido de humedad. Con dichos valores se confeccionó la curva de contenido de humedad volumétrico - distancia a la superficie evaporante, para cada uno de los 15 cilindros utilizados para los cálculos. Con ese propósito se procedió al ajuste de funciones matemáticas de los puntos obtenidos y al ajuste manual. Posteriormente se hallaron las derivadas e integrales de cada una de las funciones que mejor ajustaron. Se obtuvieron los valores de $D(\theta)$, (para cada cilindro), a partir de la aplicación de la ecuación nro. 1. Luego se calculó la media geométrica y su intervalo de confianza, a partir de los valores de difusividad obtenidos en función de diferentes contenidos de humedad. El mismo procedimiento se siguió

para la curva ajustada manualmente, calculando las derivadas e integrales por el método gráfico. Con los valores así obtenidos se procedió a calcular la conductividad hidráulica no saturada a través de la siguiente fórmula:

$$K(\theta) = D(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta \Psi}$$

Don $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica no saturada y $\frac{\delta \theta}{\delta \Psi}$ es la inversa de la derivada de la curva característica de humedad para un valor de θ .

El resultado se expresó como $K(\Psi)$ conductividad hidráulica en relación al potencial mátrico del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Como resultado de las comprobaciones de las condiciones 1 y 2 anteriormente mencionadas, puede verse la figura 2, que corresponde a dos de los cilindros analizados. En todos los casos estudiados la linealidad se alcanzó aproximadamente a los 5 minutos de comenzada la experiencia. Este valor es similar al encontrado por Ehlers (1977), para suelos no laboreados, pero resulta mayor que el requerido por las muestras de Arya et al (1975).

Una posible fuente de error de esta metodología, consiste en que la superficie evaporante del suelo no

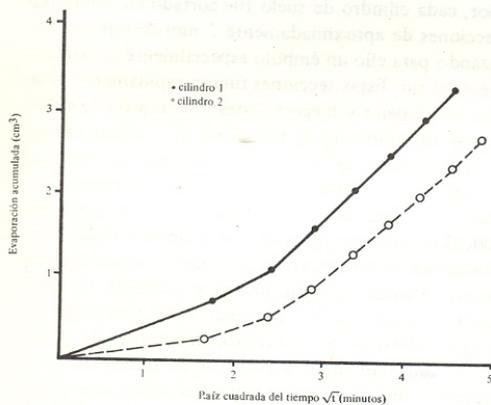


Figura 2: Dos ejemplos de Relación entre evaporación acumulada de los cilindros y \sqrt{t} (t = tiempo)

alcanza rápidamente una humedad constante como lo requieren las condiciones de contorno (Van Grinsven et al, 1985). Esto podría determinar la no linealidad durante los primeros minutos. Con respecto a los ejemplos analizados en la literatura puede observarse que existe una relación directa entre la magnitud de la superficie evaporante y el tiempo que tarda la evaporación en alcanzar la linealidad. Los cilindros utilizados en el presente trabajo poseen un diámetro interno de 4.2 cm, que resulta intermedio entre los usados por Ehlers (1977) y Arya (1975), que fueron de 5.4 y 3.65 cm de diámetro, respectivamente, lo cual explica las diferencias halladas.

Para reducir el tiempo necesario para alcanzar la linealidad, Van Grinsven et al. (1985) proponen dos alternativas.

a) si el intervalo en que no se cumple la linealidad es pequeño (1 o 2 minutos), se podría computar como el tiempo efectivo de la experiencia, aquel que resulta de restar al tiempo total, los primeros minutos del procesamiento. b) si la condición anterior no se cumple, puede acentuarse la linealidad a través de aplicar un flujo de aire de gran temperatura al comienzo (240° C), para luego reducirla paulatinamente. Esto se justifica teniendo en cuenta que el requisito de energía para lograr la evaporación se reduce con el cuadrado del tiempo. Esta segunda posibilidad posee la ventaja de no introducir gradientes de temperatura en los cilindros que podrían alterar el flujo de agua tal como ocurriría si las muestras fueran tratadas durante todo el período de desecamiento con altas temperaturas. Sin embargo en el presente trabajo se consideró inconveniente aumentar la temperatura del flujo de aire mucho más allá de los 100° C, debido a que las muestras corresponden a un suelo que posee alto contenido de materia orgánica y smectitas. Los mismos ante temperaturas muy elevadas pueden producir cambios marcados en la porosidad, que alterarían los resultados experimentales.

El segundo requisito para la aplicación de esta metodología se cumplió en la totalidad de las muestras. Esto significa que el tiempo durante el cual se aplicó el flujo de aire sobre el suelo considerado (21 minutos), no fue excesivo. Un ejemplo de lo anteriormente dicho puede observarse en la figura 3. En ella se advierte que el contenido de agua de la parte distal del cilindro una vez procesada la muestra, coincide con la humedad inicial al comienzo de la experiencia.

Una vez comprobado el cumplimiento de los requisitos previos, se procedió a buscar una función matemática que lograra el mejor ajuste de los pares de va-

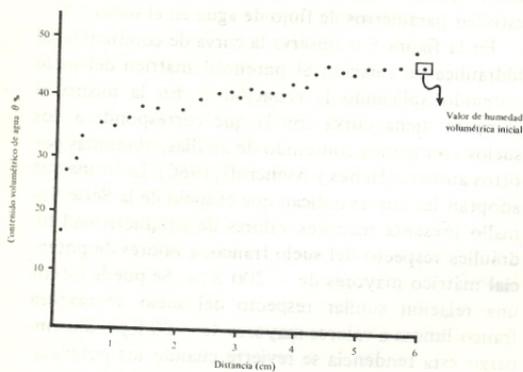


Figura 3. Ejemplo de pares de valores "Humedad volumétrica del suelo - distancia a la superficie evaporante" para un cilindro.

lores obtenidos. Esto se realizó con el fin de lograr la estandarización del manejo de los datos, en lugar del ajuste manual de los mismos utilizado en la bibliografía, a través del cual pueden introducirse errores que afecten la respetibilidad de los resultados.

Para tal fin se probaron las funciones: logarítmica,

potencial, hiperbólica, parabólica y exponencial, encontrando un mejor ajuste (R cuadrado ≥ 0.9) cuando se utilizaron las dos primeras curvas. Finalmente se hallaron las integrales y derivadas de las funciones antes mencionadas; a través de la aplicación de la ecuación 1, se obtuvieron los valores de $D(\theta)$ para cada cilindro. Las medias geométricas correspondientes a los ajustes logarítmico, potencial y manual, con sus intervalos de confianza, se observan en la figura 4. La forma que adoptan las curvas es similar a la hallada por Ehlers (1976, 1977) y Arya (1975), es decir que la difusividad respecto del contenido de humedad, en los casos en que se aplicó este método tuvo un comportamiento físico esperado.

Las medias geométricas no presentan diferencias estadísticas significativas (PO,05) para cada uno de los contenidos hídricos analizados. Sin embargo se puede observar que los intervalos de confianza son de mayor amplitud en el ajuste manual, para altos contenidos de humedad; lo mismo ocurre con el ajuste potencial para los valores de humedad volumétrica de 20% o inferiores.

La variabilidad de los valores obtenidos es similar a la encontrada por Ehlers (1976) y su magnitud guarda relación con las cifras citadas en la literatura para el análisis de parámetros físicos donde intervienen flujos de agua en el suelo (Nielsen et al, 1973; Albrecht et al, 1985).

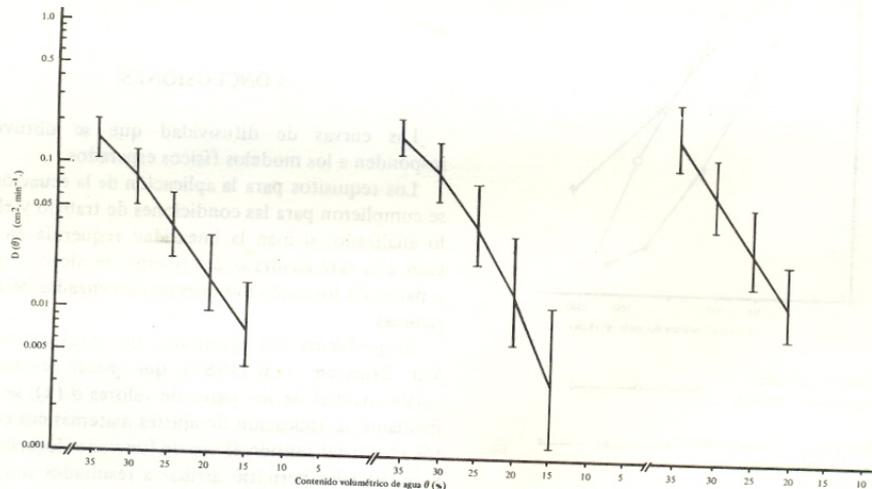


Figura 4. Medias geométricas e intervalos de confianza de los valores de difusividad en función del contenido volumétrico de agua en el suelo, obtenidos a partir del uso de los ajustes logarítmico, potencial y manual respectivamente en los pasos

+ $D(\theta)$: Difusividad del agua en el suelo.

Luego se calculó el nro. de muestras a extraer utilizando la fórmula citada por Ehlers (1976) que consiste en:

$$n = t^2 (s \log. d)^2 / (0,5 \log. F)^2$$

siendo (s log. D), el desvío estandar de los logaritmos de las difusividades, calculado como promedio entre los distintos contenidos de humedad para cada uno de los ajustes usados.

F = la relación que se admite entre los extremos de un intervalo de confianza (se utilizó $F = 3.16$, o sea $\log. F = 0.5$).

t = valor del estadístico t para $p = 0.05$.

El número de muestras a extraer varió entre 5 (ajuste logarítmico), 6 (ajuste manual) y 10 (ajuste potencial). El reducido número de muestras a extraer

en relación con el grado de precisión deseado y la sencillez operativa del método lo hacen adecuado para estudiar parámetros de flujo de agua en el suelo.

En la figura 5 se observa la curva de conductividad hidráulica en relación al potencial mátrico del suelo obtenido aplicando la ecuación 2. En la misma se compara dicha curva con la que corresponde a dos suelos con menor contenido de arcillas, obtenidas por otros autores, (Hanks y Aschcroft, 1980). La forma que adoptan las curvas indican que el suelo de la Serie Ramallo presenta menores valores de conductividad hidráulica respecto del suelo franco, a valores de potencial mátrico mayores de -200 Kpa. Se puede inferir una relación similar respecto del suelo de textura franco limosa a valores mayores de -20 Kpa. Sin embargo esta tendencia se revierte cuando los potenciales mátricos son bajos, lo cual refleja la predominancia de la microporosidad en este suelo, por la cual, el movimiento capilar del agua se mantiene aun con contenidos bajos de humedad. Teniendo en cuenta las diferencias texturales de estos suelos, dichas curvas guardan una relación semejante a la citada por Hillel (1970).

Dadas las buenas condiciones estructurales de la situación analizada (tabla 1), cabe esperar que la conductividad hidráulica no saturada de la Serie Ramallo para altos contenidos de humedad, sea aun menor en las situaciones que presenten degradación física.

CONCLUSIONES

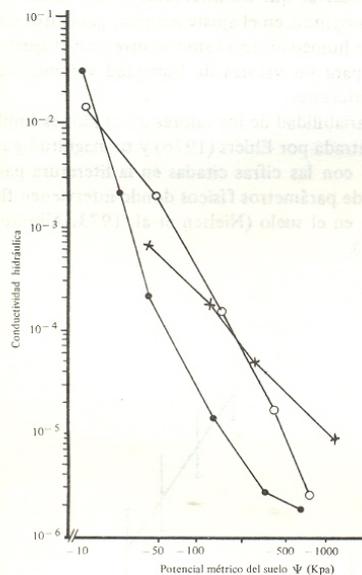
Las curvas de difusividad que se obtuvieron responden a los modelos físicos esperados.

Los requisitos para la aplicación de la ecuación (1) se cumplieron para las condiciones de trabajo y el suelo analizado, si bien la linealidad requerida en relación a la raíz cuadrada del tiempo, se alcanzó recién a partir de los cinco minutos de comenzadas las experiencias.

El problema del manipuleo de datos citado por Van Grinsven et al (1985), que puede resultar del ajuste manual de los pares de valores $\theta(x)$, se evitó mediante la aplicación de ajustes matemáticos con altos r^2 . en tal sentido el uso de funciones logarítmicas y potenciales permitió arribar a resultados similares respecto del ajuste manual.

El número de muestras necesarias, resultó menor cuando se utilizó el ajuste logarítmico.

Esta metodología aplicada a suelos de texturas me-



- a) suelo de textura franca (Hanks y Aschcroft, 1980). ○ ○ ○ ○ ○
- b) suelo de textura franco-limosa (Hanks y Aschcroft, 1980). ● ● ● ● ●
- c) suelo de textura franco-arcillo-limosa (serie Ramallo) × × × × ×

Figura 5. Valores de conductividad hidráulica correspondientes a 3 suelos en relación al potencial mátrico de los mismos.

dias, con contenidos de humedad intermedios, resulta adecuada para ser utilizada en estudios de caracterización y variabilidad del movimiento de agua en el suelo. Su sencillez operativa permite su implementación en laboratorios que cuenten con equipamiento mínimo. La curva de conductividad hidráulica obtenida indica que el horizonte All de la Serie Ramallo mantiene un valor de flujo hídrico mayor al que corresponde a suelos de textura media, cuando el mismo se halla con bajos contenidos de agua. Esta característica se ve parcialmente limitada a causa de los procesos de agrietamiento que normalmente se producen, los cuales interrumpen dicho flujo.

El método empleado no permitió obtener valores de conductividad hidráulica para contenidos hídricos superiores a la capacidad de campo. Sin embargo, a partir de la tendencia que muestra la curva, se puede inferir que los mismos resultarían de menor magnitud respecto de los suelos comparados.

La reducida conductividad hidráulica correspondiente a alto contenido de humedad se asocia a una baja capacidad de infiltración. Este hecho sumado a la susceptibilidad al encostramiento y la presencia de un horizonte B2t de lenta permeabilidad, explica la magnitud de los escurrimientos superficiales y los procesos de erosión hídrica que afectan a esta Serie.

La reducida velocidad del flujo hídrico también incide sobre el ritmo de absorción de agua por parte de las raíces de los cultivos, constituyendo esta otra limitante de este suelo, respecto de los parámetros hídricos.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero civil Rolando Wartenberg, por su colaboración en el análisis matemático de los datos.

REFERENCIAS

- Albrecht, K.A.; Logsdon, S.D.; Parker, J.C. y Baker, J.C.; 1985 . Spatial variability of hydraulic properties in the Emporia Series. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1498-1502.
- Arya, L.M., Farrell, D.A. y Blake, G.R. 1975 . A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots:1- Determination of hydraulic properties of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 424-430.
- Bouma, J.; Hillel, D.; Hole, F.D y Amerman, C.R. 1971 . Field measurement of hydraulic conductivity by infiltration through artificial crust. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:362-364.
- Bruce, R.R. y Klute, A. 1956 . The measurement of soil moisture diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20: 458-462.
- Ehlers, W. 1976 . Rapid determination of insaturated conductivity in tilled an untilled loess soil soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:837-840.
- Ehlers, W. 1977 . Measurement and calculation of hydraulic conductivity in horizons of tilled and untilled loess derived soil, Germany. *Geoderma* 19: 293-306.
- Hanks y Aschcroft G.I. 1980 . *Applied soil physics, soil water and temperature applications*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg N.Y.
- Hillel D. 1970 . *Soil and water physical principles and processes*. Academic Press. New York and London. 275 pp.
- Jaynes D.B. y Tyler, E.J. 1980 . Comparison of one-step outflow laboratory method to an in-situ method for measuring hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 903-907.
- Nielsen D.R. y Davidson, J.M. 1964 . Water movement through Panocle clay loam soil. *Hilgardia* 35:491-505.
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W. y Erh, K.T. 1973 . Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia* 42:215-259.
- Passioura, J.B. 1976 . Determining soil water diffusivities from one step out-flow experiments. *Aust. J. Soil Res.* 15: 1-8.
- Topp G.C. y Binns, M.R. 1976 . Field measurement of hydraulic conductivity with a modified air-entry permeater. *Can. J. Soil Sci.* 56: 139-147.
- Van Grinsven, J.J.M., Dirken, C. y Bouten, W. 1985 Evaluation of the hot air method for measuring soil water diffusivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1093-1099.