

## ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POR RETORNO DE RIEGO A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES. ANÁLISIS DE CAMPO, LABORATORIO Y MODELACIÓN

J. Jiménez<sup>1</sup>, T.H. Skaggs<sup>2</sup>, M. Th. van Genuchten<sup>2</sup>, L.Candela<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña-UPC, Gran Capitán s.n., 08034 Barcelona, España. joaquin.jimenez@upc.edu

<sup>2</sup> U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, 450 W Big Springs Rd., 92507 Riverside, CA, USA.

**RESUMEN.** Se presenta un estudio experimental para evaluar la tasa de recarga hacia el acuífero mediante una parcela experimental localizada en el Campo de Cartagena (SE España). El cultivo empleado ha sido lechuga y el tipo de riego localizado. Se realizó una completa caracterización en laboratorio (físico-química e hidráulica) de la zona no saturada (zns). En la parcela experimental ha sido instalada diferente instrumentación (tensiómetros, lisímetros de succión, TDR...) para monitorizar parámetros químicos e hidráulicos a diferente profundidad. Usando HYDRUS-1D hemos simulado la absorción de agua realizada por las plantas y el flujo a través de la zns. Para el periodo simulado, el 76% del volumen total aplicado sobre la parcela (precipitación + riego) supera la zona radicular y contribuye a la recarga del acuífero.

**ABSTRACT.** This work is aimed at quantifying aquifer recharge due to irrigation in the Campo de Cartagena (SE Spain). A study of recharge was conducted on an experiment plot cropped in lettuce and irrigated with a drip system. The physico-chemical and hydraulic properties of the vadose zone were characterized through laboratory measurements. In the experiment plot, instrumentation (tensiometers, suction cups, TDR) was installed for monitoring soil conditions at different depths. Using HYDRUS-1D, we simulated crop water uptake and flow through the vadose zone. For the cropping period simulated, 76% of the combined irrigation and precipitation water passed below the root zone and contributed to aquifer recharge.

### 1.- Introducción

En regiones áridas y semiáridas, la recarga de acuíferos es uno de los términos más difíciles de estimar, debido a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y evapotranspiración. La pérdida de agua por evaporación así como por transpiración llevada a cabo por la vegetación, y la evaporación directa del suelo, constituye un importante recurso el cual es necesario cuantificar en estudios hidrológicos (Garatuza-Payan et al. 1998). Para ello se han aplicado diferentes metodologías, con mayor o menor éxito en la estimación de la recarga (Scanlon et al.

2002).

Para conocer el flujo de agua a través de la zns es importante la determinación de propiedades de tipo físico-químico, ya que presentan una estrecha relación con las propiedades hidráulicas, así como su monitorización.

La simulación del potencial matricial o succión ( $h$ ) y del contenido volumétrico de agua o humedad en el suelo ( $\theta$ ), es una buena aproximación para estimar la recarga por retorno de riego, así como la eficiencia del mismo.

Para alcanzar este objetivo, se ha llevado a cabo la modelación del potencial matricial y del contenido de agua mediante el código HYDRUS-1D (Šimůnek et al. 2005), que permite modelar flujo de agua, calor y transporte de solutos en medios porosos. Este trabajo está enmarcado dentro de un proyecto mucho más amplio, cuyo objeto es evaluar la recarga anual en un acuífero a partir de los excedentes de riego de diferentes cultivos, por lo que la experiencia se prolongará desde mayo de 2006 hasta septiembre de 2008.

El Campo de Cartagena es un área sobre la que se desarrolla una agricultura intensiva y la cual esta sufriendo un crecimiento demográfico importante, además de presentar un importante déficit de recursos hídricos. Por esta razón se plantea la necesidad de tener en cuenta la tasa de recarga producida por los excedentes de regadío en la gestión de los recursos hídricos de la zona.

### 2.- Materiales y métodos

#### 2.1. Caracterización y monitorización

Para este estudio se ha realizado la caracterización y control de la zns, en una parcela ubicada en la finca experimental Tomas Ferro (La Palma) propiedad de la Universidad Politécnica de Cartagena-UPCT y situada en el Campo de Cartagena (Murcia).

En laboratorio fue realizada la caracterización de las propiedades físico-químicas e hidráulicas de la zns, para lo cual se emplearon metodologías ampliamente aplicadas, como se muestra en la Fig. 1.

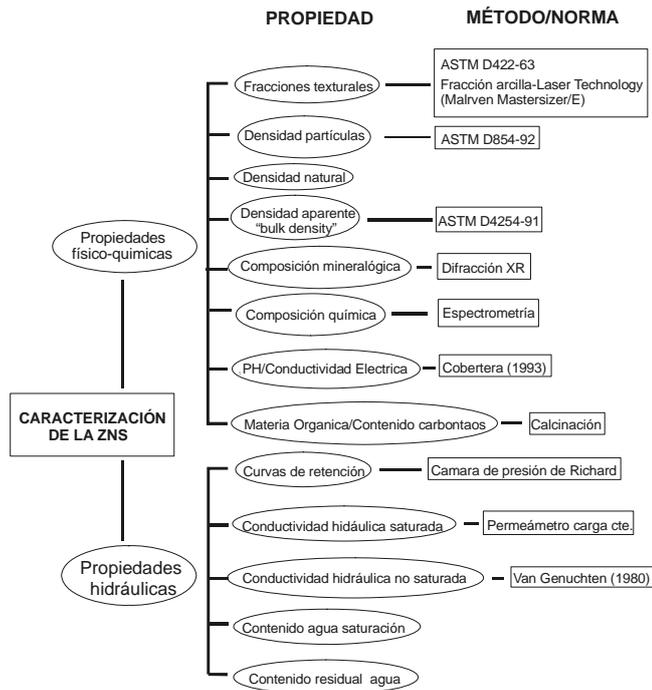


Fig. 1. Esquema de las diferentes propiedades determinadas y metodología empleada.

Los resultados obtenidos para las diferentes propiedades se muestran en Jiménez et al. 2007.

La monitorización (Fig. 2) esta enfocada a la caracterización hidrodinámica del proceso de infiltración. Con este fin, fueron instalados por duplicado a las profundidades de 30, 45, 60, 90 y 120 cm, 10 tensiómetros (Soilmoisture®) para el control del potencial matricial, y 10 lisímetros de succión. Para el control del contenido de agua en el suelo o humedad, se instalaron dos tubos de hasta 2 m de profundidad, que permiten mediante TDR (TRIME-FM, Imko®) realizar perfiles verticales de humedad. Se realizó una corrección de acuerdo con Laurent et al. (2001; 2005).

Los instrumentos fueron cuidadosamente distribuidos para evitar interferencias en el flujo (Caballero, 1996). En el caso del potencial matricial la frecuencia de medida es semanal, mientras que para el contenido de humedad es mensual.

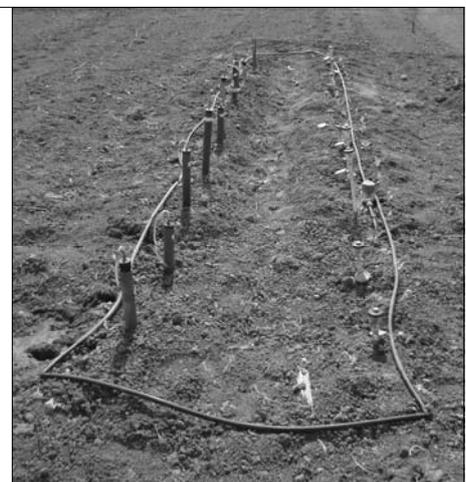
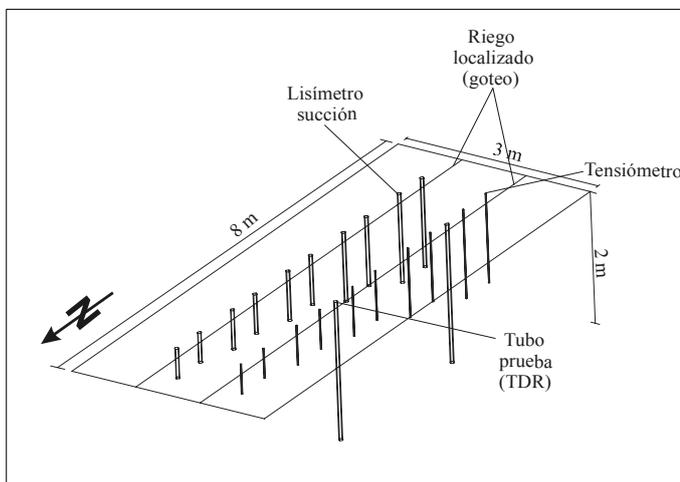


Fig. 2. Dimensiones de la parcela experimental e instrumentación instalada

## 2.2. Modelo numérico

Para la simulación del proceso de infiltración se utilizó el código HYDRUS-1D (Šimůnek et al. 2005). La ecuación que gobierna el movimiento del agua en un medio rígido parcialmente saturado a partir de la modificación de la ecuación de Richard y de dos supuestos: el aire no juega un papel importante y los gradientes térmicos pueden ser despreciados, queda escrita de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \sigma \right) \right] - S \quad (1)$$

donde  $h$  es el potencial matricial [L],  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua [ $L^3 L^{-3}$ ],  $t$  es el tiempo [T],  $x$  es la coordenada espacial [L],  $S$  es el termino sumidero [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ],  $\sigma$  es el ángulo entre la dirección de flujo y un eje vertical ( $0^\circ$  flujo vertical;  $90^\circ$  flujo horizontal), y  $K$  es la conductividad hidráulica no saturada [ $L T^{-1}$ ].

Las propiedades hidráulicas del suelo fueron modeladas usando la ecuación constitutiva de van Genuchten-Mualem:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + |\alpha h|^n \right]^{1-1/n}} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

donde  $\theta(h)$  es el contenido volumétrico de agua ( $cm^3 cm^{-3}$ ) a succión  $h$  (cm). Los parámetros  $\theta_r$  y  $\theta_s$  son contenido residual y contenido de agua a saturación, respectivamente, ( $cm^3 cm^{-3}$ );  $\alpha$  ( $>0, cm^{-1}$ ) es el inverso del valor de entrada de aire, y  $n$  ( $>1$ ) es un índice de la distribución de poro. En ocasiones aparece escrito  $1-1/n = m$ .

$$K(h) = K_s S_e^l \left\{ 1 - \left[ 1 - S_e^{n/(n-1)} \right]^{1-1/n} \right\}^2 \quad (3)$$

siendo  $K_s$  la aproximación correspondiente al punto de saturación ( $cm d^{-1}$ ),  $l$  el parámetro empírico que representa la conectividad de poros y normalmente se asume como 0.5, y

$S_e$  la saturación efectiva:

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

Para ejecutar el modelo se requieren los parámetros hidráulicos  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $K_s$  y  $l$  (Tabla 1). Para ello se utilizó ROSETTA (Schaap et al. 2001), una función de edafotransferencia basada en un modelo de red neuronal para la estimación de parámetros hidráulicos a partir de propiedades físicas conocidas como son las propiedades texturales y la densidad aparente.

### 2.3. Datos meteorológicos y de cultivo

Para llevar a cabo esta experiencia, son necesarios datos diarios de precipitación  $P$  (cm) y regadío  $I$  (cm). La evapotranspiración de referencia  $ET_0(t)$  (cm) se ha calculado por el método de Penman-Monteith y a continuación se ha estimado la evapotranspiración potencial  $ET_p(t)$  (cm) para el cultivo en condiciones estándar como sigue:

$$ET_p(t) = K_c(t) \cdot ET_0(t) \quad (5)$$

donde  $K_c(t)$  es el coeficiente característico del estado de desarrollo de cada cultivo y que es función del tiempo (Fig. 3).

La longitud (en días) de estos intervalos para el cultivo de lechuga han sido tomados de Doorenbos y Pruitt (1977), mientras que los valores de  $K_c$  para cada uno de los intervalos, han sido tomados de Allen et al. (1998).

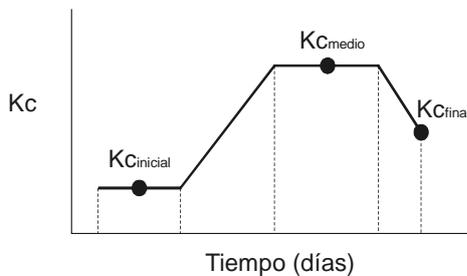


Fig. 3. Curva del coeficiente característico  $K_c$ .

Una vez obtenido  $ET_p(t)$ , se puede realizar el cálculo de la evaporación potencial  $E_p(t)$  (cm) y de la transpiración potencial  $T_p(t)$  (cm) para el cultivo:

$$E_p(t) = ET_p(t) \cdot e^{-\beta \cdot LAI(t)} \quad (6)$$

siendo  $\beta$  el coeficiente de radiación ( $\sim 0.4$ ) y  $LAI(t)$  el índice foliar, que varía con el tiempo para cada cultivo.

Por tanto la transpiración potencial  $T_p(t)$  realizada por la planta en cada momento, sería:

$$T_p(t) = ET_p(t) - E_p(t) \quad (7)$$

Es necesario conocer la profundidad radicular máxima alcanzada  $Z_r$  (cm) por este cultivo, ya que guarda una relación directa con la transpiración llevada a cabo por la planta y con el flujo en los primeros centímetros del suelo. Según Allen et al. (1998) los valores máximos alcanzados por la lechuga oscilan de 30 a 50 cm.

### 3.- Resultados

Para modelar el flujo se han realizado una serie de suposiciones. Como condiciones de contorno se han considerado en la superficie condiciones atmosféricas y en la base drenaje libre, siendo estas variables en el tiempo. Se ha despreciado el fenómeno de histéresis y se ha considerado modelo de porosidad simple. Finalmente, como función de repuesta de la planta al stress hídrico, se ha considerado el modelo de Feddes et al. (1978).

Para alcanzar el objetivo de estimar la recarga por retorno de riego, se ha simulado el potencial matricial o succión ( $h$ ) y el contenido volumétrico de agua o humedad ( $\theta$ ). El cultivo de lechuga se inicia el Día Del Año (DDA) 279 y finaliza el 384, considerando como DDA número uno el día uno de enero de 2006.

En la Fig. 4, y para la succión, puede observarse como los tensiómetros no se estabilizan hasta aproximadamente el DDA 298, esto es debido a la ausencia de cultivo hasta el DDA 279 y a la importante evaporación que se produce en ese momento, así como a la existencia de un solo riego (Fig. 5). A partir de ese momento el grado de correlación entre los valores simulados y medidos es más alto.

Con los flujos acumulados puede establecerse el balance de masa de agua, considerando el criterio de signos empleado por HYDRUS-1D. Una vez establecido el balance hídrico, se observa que del volumen total aplicado (precipitación + irrigación), el 76.6 % pasa a formar parte del agua subterránea.

### 4.- Conclusión

A pesar de que para este experimento controlado se conoce que no se ha regado en exceso, en comparación con las habituales dotaciones de riego empleadas por los agricultores de la zona para este tipo de cultivo, se debe señalar la elevada tasa de recarga obtenida.

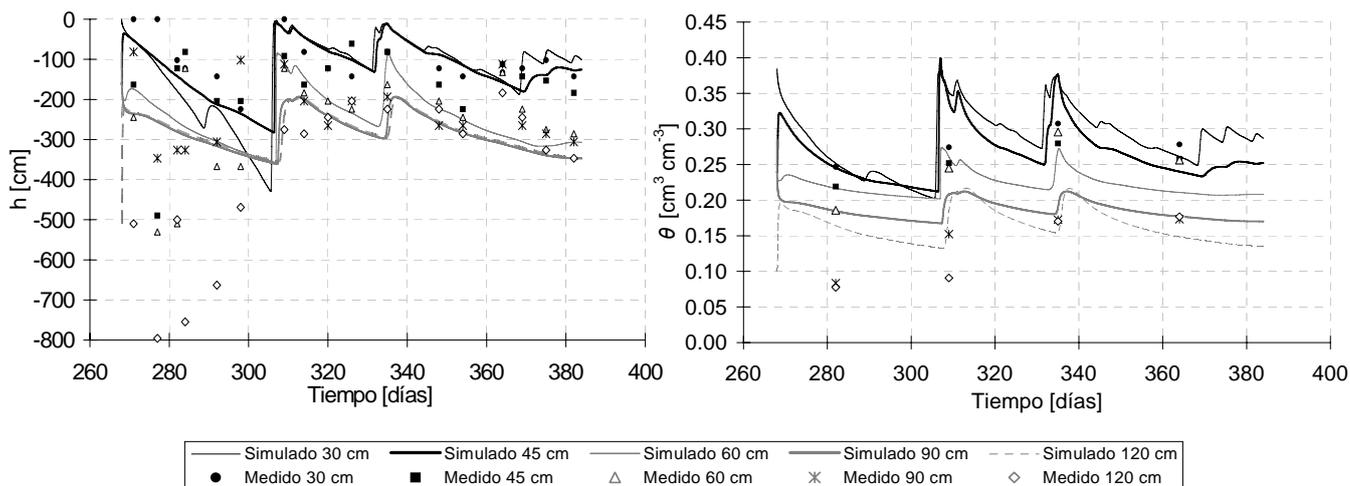
La repetición de esta experiencia para los principales cultivos que se desarrollan sobre la zona, siendo fieles tanto a las prácticas agrícolas como a las dotaciones de riego empleadas por los agricultores de la zona, permitirá conocer la tasa anual de recarga hacia el acuífero superficial libre sobre el que se llevan a cabo las prácticas agrícolas.

Los resultados obtenidos serán muy útiles en la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos de la zona, Campo de Cartagena, ya que esta es deficitaria en los

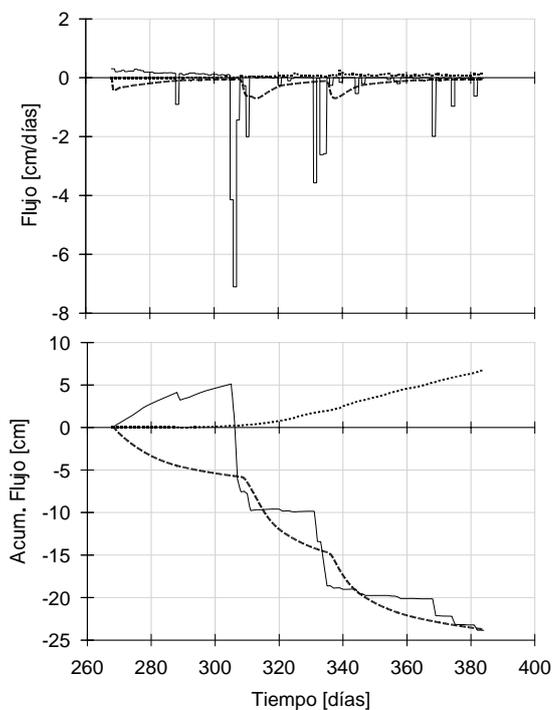
mismos.

**Tabla 1.** Distribución en profundidad de la textura y densidad aparente. Valores estimados de los parámetros independientes ( $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s, l$ ) del modelo de van Genuchten mediante ROSETTA.

Prof. (cm)	Fracciones texturales (%)			Dens. aparente (g·cm <sup>-3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	$K_s$ (cm d <sup>-1</sup> )	$l$
	Arena	Limo	Arcilla							
0-30	18.71	75.95	3.52	1.43	0.0436	0.3845	0.0065	1.6338	51.30	0.5
30-60	13.80	80.20	5.98	1.38	0.0514	0.4127	0.0056	1.6765	51.59	0.5
60-90	19.45	77.16	3.29	1.43	0.0427	0.3827	0.0066	1.6411	53.37	0.5
90-120	10.82	82.02	6.57	1.51	0.0503	0.3905	0.0067	1.6183	28.57	0.5



**Fig. 4.** Comparación entre simulaciones obtenidas y valores medidos en campo a diferentes profundidades (30, 45, 60, 90 y 120 cm), tanto el potencial matricial (izquierda) como la humedad (derecha).



**Fig. 5.** El gráfico superior presenta la evolución temporal de los diferentes flujos y el inferior la acumulada de los mismos. Flujo a través de la superficie (línea continua), incluye riego, precipitación y evaporación; transpiración (línea punteada); flujo en la base (línea de trazos)

**Agradecimientos.** Este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto CGL-2004-05963-C04-01, y del proyecto TRAGUA (CONSOLIDER-2010) plan nacional I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia. Los autores agradecen al Dr. Gregorio García (UPCT) la ayuda prestada en logística.

## Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage*. Paper No. 56, FAO, Rome.
- Caballero, J. (1996): Movilidad el herbicida glifosato a través de la zona no saturada. Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cobertera, A. (1993) *Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales*. Ediciones Cátedra, Madrid, 191 pp.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1977) *Crop water requirements. Irrigation and Drainage*. Paper No. 24 (rev.) FAO, Rome. 144 pp.
- Feddes, R. A., Kowalik, P.J. y Zaradny, H. (1978) *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Gartuza-Payán, J., Shuttleworth, W.J., Encinas, D., McNeil, D.D., Stewart, J.B., DeBruin, H. y Watts, C. (1998) Measurement and Modelling evaporation for irrigated crops in Northwest Mexico. *Hydrol. Proc.*, 12, 1397-1418.
- Jiménez, J., García, G., Queralt, I., Aragón, R., García-Arostegui, J. L., Solano, F. y Candela, L. (2007) Vadose Zone Characterization in an Experimental Plot Under Intensive Agriculture. Preliminary Results. International conference Water POLLution in natural POrous media at different scales (WAPO<sup>2</sup>). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. N° 22. 143-148.
- Laurent, J.P., Ruelle, P., Delage, L., Bréda, N., Chanzy, A. y Chevallier, C. (2001) On the use of the TDR Trime-Tube system for profiling water content in soil. Proceedings TDR '01, Evanston-Illinois, USA 5-2 Sept. 2001. 1-10.
- Laurent, J.P., Ruelle, P., Delage, L., Zaïri, A., Ben Nouna, B. y Adjmi, T. (2005) Monitoring Soil Water Content Profiles with a Commercial TDR System: Comparative Field Tests and Laboratory Calibration. *Vadose Zone J.* 4:1030-1036.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.* 10. 18-39.
- Schaap, M.G.; Leij, F.J. y van Genuchten, M.Th. (2001) ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251, 163-176.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. y Šejna, M. (2005) The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variability Saturated Media, Version 3.0. Department of Environmental Sciences University of California Riverside, Riverside, California, 270 pp.
- van Genuchten, M. Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898.

