

SORTIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA DE UDOLES DEL SUDESTE BONAERENSE, ARGENTINA

FN CABRIA y J Ph CULOT

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. C.C. 276. (7620). Balcarce, Argentina.

SORTIVITY AND SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF UDOLLS SOILS IN SOUTH EASTERN OF BUENOS AIRES PROVINCE, ARGENTINA

Sortivity and saturated hydraulic conductivity were estimated for three representative soil series in the south eastern Pampa of the Buenos Aires province. The goodness of fit of several equations in calculating sortivity (S) and final infiltrability (i_c) of soils was assessed and errors estimated when truncated algorithms were applied. Infiltration data were obtained using a double ring infiltrometer device. S and i_c were calculated from the Philip two terms equation and the truncated algorithm of Swartzendruber with one to five coefficients. The Philip equation overestimated S and underestimated i_c . During hydration, the magnitude and direction of surface tensible force changed. It is suggested that A, B, C, \dots, N coefficients of Swartzendruber equation represent the directional and magnitudinal changes in the evolution of sortivity. In the soils under study these changes are influenced by the initial water content and by the modifications in the design of the pore space resulting from differential expansibility of matrix elements. In three soils, final infiltrability calculated through Swartzendruber algorithm was equivalent to saturated hydraulic conductivity (K) measured through the Klute method.

Key words: Simulation, final infiltrability, estimation, sortivity, saturated hydraulic conductivity

INTRODUCCION

La irregularidad en la frecuencia y cantidad de las precipitaciones pluviales en la Región Pampeana, suele ocasionar daños a la producción agropecuaria. En algunos casos, las mermas en la producción de cultivos y forrajes son severas (INTA-SAGyP 1995, 1996) y para soslayar estos perjuicios, recientemente se ha comenzado a aplicar riego por aspersión con equipos de pivote central o avance frontal, alimentados con agua subterránea.

En el sector periserrano de Tandilia, en el centro-sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, las pendientes son considerables y gran parte de los suelos están limitados en profundidad por horizontes petrocálcicos o roca. En los últimos años se ha observado que el riego por aspersión ha acrecentado el escurrimiento superficial y la erosión hídrica, y dado que el conocimiento de los parámetros hidráulicos permite determinar la máxima intensidad con que una

lámina de agua debe ser suministrada para evitar un excesivo escurrimiento superficial (Drissen 1986), es necesario determinarlos en suelos representativos de la región mencionada.

Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar la aptitud de distintos algoritmos para estimar sortividad (S) e infiltrabilidad final a 240 minutos (i_c) y 2) analizar la factibilidad de asumir a las magnitudes de la conductividad hidráulica saturada (K) e i_c como equivalentes.

MATERIALES Y METODOS

Consideraciones teóricas

Numerosas fórmulas, algunas enteramente empíricas y otras con bases teóricas, han sido propuestas con el objeto de determinar la infiltrabilidad (i) y/o la cantidad total del agua infiltrada por un suelo (I) en función del tiempo transcurrido (t). En el marco del presente trabajo infiltración que se produce cuando existe agua a presión atmosférica en la superficie del suelo se denomina infiltrabilidad al flujo o la tasa de

(Hillel 1982). A continuación se hace un breve análisis de aquellas fórmulas que representan cronológicamente las comentadas más destacadas que la problemática del tema abordado ha generado.

Green y Ampt postularon en 1911 la primera ecuación (Hillel 1982):

$$i_t = i_c + b/\sqrt{t} \quad (1)$$

siendo:

i_t : infiltrabilidad al tiempo t ($\text{cm} \cdot \text{t}^{-1}$),
 i_c : flujo de infiltración estable o infiltrabilidad final, ($\text{cm} \cdot \text{t}^{-1}$), I_t : infiltración acumulada al tiempo t (cm) y b : constante.

En esta ecuación i_c y b son las constantes que caracterizan la infiltrabilidad final, alcanzándose a elevados valores de t y quizás de I_t .

Otra ecuación, de carácter estrictamente empírico, es atribuida a Lewis quien en 1937 la utilizó para calcular la infiltración acumulada como una función del tiempo transcurrido (Swartzendruber 1993). También se conoce como ecuación de Kostiaikov.

$$I_t = a \cdot t^b \quad (2)$$

siendo:

I_t : infiltración acumulada al tiempo t (cm), a : constante positiva y b : constante positiva menor de 1

Otra ecuación fue presentada por Horton (1940):

$$i_t = i_c + (i_0 - i_c) \cdot e^{-at} \quad (3)$$

i_t , i_c y t representan las mismas variables que en las ecuaciones precedentes, i_0 es la infiltrabilidad inicial. A $t=0$ la infiltrabilidad inicial es finita y el coeficiente a determina cuán rápidamente disminuye la infiltrabilidad desde i_0 hasta i_c . La ecuación es integrable, obteniéndose I_t como una función explícita de t .

La ecuación proporcionada por Philip (1957) ha sido quizás la más utilizada:

$$i_t = i_c + S \cdot (2t)^{-1/2} \quad (4)$$

donde i_t , i_c y t representan las mismas variables que en las ecuaciones precedentes. S es la sortividad y junto con i_c son los parámetros de caracterización. S se expresa como $\text{cm} \cdot \text{t}^{1/2}$.

La sortividad es un parámetro simple, que representa la influencia que la succión mátrica y la conductividad ejercen sobre el flujo de agua transitorio, describiendo la función descendente de la infiltrabilidad con relación a los cambios en el contenido de humedad de los suelos o succión (Philip 1969).

En las ecuaciones (1) y (2), y al integrar la ecuación (4), I_t es nula cuando $t=0$, postulándose que la infiltrabilidad inicial (i_0)

tiende al infinito. Las ecuaciones (1) y (3) definen al valor de la infiltrabilidad final constante y mayor que i_c , en cambio, la (2) lo asume convergente a cero cuando t tiende al infinito. Con la integración de la ecuación (4) se obtiene el agua acumulada por infiltración (I_t) en función del tiempo transcurrido (t):

$$I_t = S \cdot t^{1/2} + i_c \cdot t \quad (5)$$

Holtan en 1961 postula: (citado por Swartzendruber y Clague 1989)

$$i_t = i_c + a(M - I_t)^n \quad (6)$$

i_c , a , M y n son constantes, y excepto los parámetros M y n , los restantes representan las mismas variables que en las ecuaciones precedentes. Este autor especifica que M es la capacidad de almacenaje de un suelo por encima del primer estrato de impedimento, pero en un suelo sin capas limitantes, su significado no está claramente expuesto (Hillel 1982). Además, si bien la ecuación (6) es integrable, sólo provee t como una función explícita de I_t , pero no viceversa, como la ecuación (4).

Las ecuaciones (1) y (4) son soluciones matemáticas para la teoría de infiltración basada en el concepto físico del flujo de agua que sostiene que la infiltración acumulada es proporcional a $t^{1/2}$ en los momentos iniciales del proceso; y que el valor de $\partial I/\partial t$ se aproxima a una constante a tiempos muy prolongados pudiéndose asumir que su magnitud es equiparable a la de la conductividad hidráulica saturada (Philip 1969). Por lo tanto se expresa en $\text{cm} \cdot \text{t}^{-1}$.

Por el contrario, las ecuaciones (2), (3) y (6) son expresiones empíricas ampliamente utilizadas por describir correcta y cualitativamente la forma de la curva de infiltración. Otras dos ecuaciones totalmente empíricas que también son muy utilizadas debido a su carácter heurístico, son la de Stroosnijer publicada en 1976 y la de Collis George de 1977 (Swartzendruber, Clague 1989).

Philip (1969, 1974), Parlange (1975), Brutsaert (1977) y Parlange *et al.* (1982) y Swartzendruber (1987), presentaron ecuaciones de infiltración que, al igual que (1) y (4), están basadas en la teoría física que establece la ecuación general del flujo de agua en el suelo. Una ecuación más reciente fue derivada por Swartzendruber (1987) a partir de una integración exacta para una cuasi-solución de la ecuación general del flujo de agua (ecuación de Richards). El algoritmo, matemáticamente deducido, permite calcular S e i_c :

$$I_t = S/A [1 - \exp(-A \cdot t^{1/2} - B \cdot t - C \cdot t^{3/2} - \dots - N \cdot t^{n/2})] + i_c \cdot t \quad (7)$$

I_i , S , e i_c representan las mismas variables que en las ecuaciones precedentes; A , B , C , y N son parámetros de caracterización con significado físico aún no definido (Swartzendruber, Clague 1989; Ali, Swartzendruber 1994). Swartzendruber y Clague (1989), demuestran que este algoritmo (7) engloba a todos los demás modelos derivados de la aplicación de la ecuación general del flujo de agua y a las ecuaciones empíricas de Stroosnijder y Collis-George, ya que todas éstas son soluciones particulares de aquel algoritmo.

Al igual que en las ecuaciones (1), (3) y (4), en las ecuaciones (6) y (7) el valor de la infiltrabilidad final se asume constante y mayor que cero cuando t tiende al infinito. En estas dos ecuaciones es factible suponer que la magnitud de i_c es equiparable a la conductividad hidráulica saturada (K), si el agua infiltrada es medida por un tiempo suficientemente prolongado. Este parámetro es importante porque representa a la velocidad de infiltración base, bajo condiciones de saturación, cuando una lámina de agua de espesor infinitesimal avanza en profundidad desde el contacto suelo-atmósfera. En otras palabras, la lámina de agua infiltrada no conlleva el efecto de una carga hidráulica o éste puede ser despreciado (Hillel 1982). En este trabajo se asume que K define la intensidad máxima de las precipitaciones o del riego por aspersión que garantizan ausencia de escurrimiento superficial, ya que según Driesseii (1986), aún cuando la evaporación actual y la capacidad de almacenaje en la superficie de un suelo fuesen nulas, el caudal crítico no sería superado.

Mediciones y análisis de los datos

En la estación experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Balcarce, Argentina, se seleccionaron ocho pedones al azar para cada una de tres series de suelos representativas del área interserrana del sudeste de la Provincia de Buenos Aires. Los suelos fueron clasificados como Argiudol Páquico, franco-fino, mixto, térmico, Paleudol Petrocálcico, fino, illítico, térmico y Paleudol Petrocálcico, fino, mixto, térmico, series Mar del Plata, Azul y El Cruce respectivamente (Cabria, Culot 1994). Todos son de aptitud agrícola, poseen epipedón mólico y horizonte de diagnóstico subsuperficial argílico, pero presentan profundidades efectivas diferentes debido a la presencia de un horizonte petrocálcico.

La mitad de los pedones de cada serie de suelo están ubicados en sitios en donde, desde 1984, se realiza agricultura bajo labranza convencional. Los pedones restantes son suelos no labrados que conforman sectores de la estación

experimental ubicados entre áreas cultivadas. Al menos en los últimos 20 años no han sido disturbados, encontrándose cubiertos por una pastura polifítica. La cubierta vegetal, de 3 a 7 cm de alto, se corta con motosegadoras sin recolección de la masa vegetal podada. A este tipo de utilización de la tierra se la denominó suelo no labrado.

En cada sitio seleccionado se realizaron ensayos de infiltración según el método de anillos concéntricos (Bouwer 1986). La lámina de agua en los cilindros internos y externos se mantuvo constante con un dispositivo basado en el principio del sifón de Mariotte. En el cilindro interno, de 20 cm de diámetro, la lámina de agua fue de 5 cm de alto. En el externo fue igual o levemente inferior. La parte inferior de los cilindros se enterró hasta 15 cm de profundidad. Las lecturas en todos los casos se extendieron por períodos no menores de 240 minutos, asumiendo que era un tiempo razonablemente prolongado como para que la magnitud de i_c equipare teóricamente a K .

Para ajustar los valores de I_i medidos en el campo se aplicó la metodología propuesta por Ali y Swartzendruber (1994). Para ello fue necesario utilizar las ecuaciones 2, 5 y 7.

Con la ecuación (5) y (7) truncada desde uno y hasta cinco coeficientes, se calcularon las magnitudes de S e i_c . Las ecuaciones se resolvieron por un proceso iterativo. La ecuación (2) se aplicó para calcular el valor inicial que se le asigna a i_c en los restantes algoritmos aplicados, correspondiéndole la pendiente de la recta que tienden a generar los 2 o 3 últimos pares de datos de las curvas de infiltración acumulada.

El ajuste de las ecuaciones se realizó con el comando PROC NLIN del programa estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute 1988). Con el objeto de obtener en las ecuaciones parámetros de caracterización estables, se utilizó la opción Marquardt y no se fijaron límites para los valores a ajustar. Marquardt computa los datos a partir de las derivadas parciales de las ecuaciones a resolver, estableciendo la magnitud de los parámetros a estimar, en el punto mínimo de la función objetivo cuya suma de cuadrados residuales satisface un criterio de convergencia de 10^{-8} . Los valores iniciales de G , H y A fueron los sugeridos por Ali y Swartzendruber (1994).

Los modelos fueron evaluados a partir del cuadrado medio residual (CMR), del análisis de los residuos y la aceptabilidad desde el punto de vista físico de los valores alcanzados por S e i_c (Mead *et al.* 1993). El criterio de selección que se utilizó para calificar a uno de los modelos probados como el más apropiado en describir la

de vista físico de los valores alcanzados por $S e i_c$ (Mead *et al.* 1993). El criterio de selección que se utilizó para calificar a uno de los modelos probados como el más apropiado en describir la curva de infiltración acumulada de un pedón, contempla las siguientes condiciones: **a.** $S e i_c$ convergen a valores positivos sin haberles fijado límites al momento de ajustarlos (convergencia objetiva y positiva), **b.** distribución alcatoria de los residuos, y **c.** si un modelo cumple con las condiciones a y b, se selecciona aquel cuyo CMR es el más bajo, a no ser que dos modelos consecutivos cumplan con dichas condiciones y los valores de $S e i_c$ no difieran substancialmente. En este último caso se seleccionó el modelo más sencillo.

La primera condición es necesaria ya que valores negativos en $S e i_c$ no tienen sentido bajo marco conceptual del presente trabajo, ecuación de Richards de 1931 (Swartzendruber 1987). Aún cuando $S e i_c$ son positivos, es necesario verificar el comportamiento de los residuos (Mead *et al.* 1993; Ali, Swartzendruber 1994). Esto es así, ya que un encadenamiento en los residuos revela una falta de aleatoriedad en el signo y la magnitud de los errores, lo cual invalida la bondad de ajuste del modelo utilizado. La tercera condición del criterio responde a la aplicación del principio de simplicidad para seleccionar modelos.

La conductividad hidráulica se midió en laboratorio con la metodología desarrollada por Klute y Dirksen (1986). Las determinaciones se efectuaron a muestras no disturbadas recolectadas según dos ejes direccionales, paralelo y perpendicular a la superficie del terreno, como lo describen Dabney y Selim (1987). Sólo dos de los cuatro pedones de cada serie de suelo bajo un uso en particular, que fueron utilizados para determinar la infiltración acumulada (I) en el campo: fueron muestreados para calcular K . En este último caso los cilindros utilizados fueron de 8,6 cm de diámetro y 6,9 cm de largo. Los resultados de K son promedios de cinco submuestras, es decir, cinco volúmenes cilíndricos de un suelo en particular que fueron recolectados linealmente y separados entre sí por distancias aproximadas de 15 cm. Los valores para cada

submuestra son el promedio de cinco lecturas, las cuales se realizaron a partir del momento en que el flujo de agua alcanzó un valor constante. La fórmula aplicada para corregir el efecto de la carga hidráulica que imprime la lámina de agua impuesta en el dispositivo utilizado en el laboratorio fue la propuesta por Klute y Dirksen (1986):

$$K = VL/[At(H_2-H_1)]$$

donde K es la conductividad hidráulica saturada, V es el volumen de agua que fluye a través de una muestra de área A en un tiempo t , y (H_2-H_1) es la carga hidráulica que se le impone a la muestra de longitud L .

Con el objeto de determinar si la magnitud de $K e i_c$ a 240 minutos difieren estadísticamente ($P < 0.05$), se ejecutaron análisis de varianza a partir de datos originales y transformaciones logarítmicas haciendo uso del comando PROC GLM del paquete estadístico SAS. También se evaluó a partir de los residuos los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La normalidad se verificó utilizando la opción Normal del cuando PROC UNIVARIATE del paquete estadístico SAS. La homogeneidad de varianzas se evaluó gráficamente.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se consignan los parámetros de las ecuaciones de infiltración y sus cuadrados medios residuales (CMR) para el total de los sitios infiltrados. En la Figura 1 se puede observar la distribución de los residuos de la infiltración acumulada ajustada del perfil 21 (serie El Cruce no labrado) al aplicar los modelos de Philip (1957) y Swartzendruber (1987). El comportamiento de estos residuos representa lo acontecido en los demás perfiles y sistemas de labranza. El análisis conjunto de la información suministrada por la Tabla 1 y Figura 1 permite comparar la bondad de ajuste de los distintos modelos.

Tabla 1. Parámetros ajustados de las ecuaciones de infiltración y sus cuadros medios residuales.

		Suelos labrados:											
		Mar del Plata				Azul				El Cruce			
Nº de perfil		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Swartzendruber 1987	S*	3E-00	3E-00	4E-00	3E-00	7E-01	2E-00	2E-00	2E-00	1E-00	6E-01	1E-00	7E-01
	ic*	9E-03	5E-02	-6E-03	2E-02	2E-02	3E-02	-1E-02	1E-02	-5E-02	-5E-03	-6E-02	-5E-03
	CMR*	1E-00	4E-00	2E-00	1E+01	8E-01	3E-01	3E-00	2E-01	3E-01	1E-01	5E-01	4E-01
	S	3E-00	4E-00	5E-00	4E-00	1E-00	2E-00	2E-00	2E-00**	3E-00	7E-01	2E-00	1E-00**
	ic	4E-02	1E-01	1E-01	7E-02	4E-02	3E-02	2E-02	8E-02**	1E-02	1E-02	9E-03	2E-02**
	A	3E-02	9E-02	1E-01	8E-02	1E-01	9E-05	5E-02	1E-01	3E-01	8E-02	3E-01	2E-01
	CMR	1E-00	8E-01	9E-01	1E+01	4E-01	3E-01	3E-00	2E-01	6E-02	2E-01	1E-01	2E-01
	S	4E-00	4E-00	6E-00	2E-00	6E-01**	1E-00	1E-00**	2E-00	1E-00	6E-01	1E-00**	8E-01
	ic	1E-01	1E-01	1E-01	8E-02	5E-02**	9E-02	6E-02**	1E-01	2E-02	2E-02	1E-02**	2E-02
	A	6E-02	8E-02	2E-01	5E-02	-1E-01	-7E-02	-1E-01	1E-01	2E-01	1E-01	2E-01	2E-01
	B	-2E-03	-7E-04	-7E-03	9E-03	4E-03	3E-03	5E-03	-6E-03	7E-02	2E-02	6E-02	2E-02
	CMR	6E-01	9E-01	5E-01	7E-00	3E-02	2E-01	3E-00	2E-01	3E-02	1E-01	8E-02	2E-01
S	5E-00	5E-00	6E-00	5E-00	8E-01	2E-00	-3E-00	3E-00	1E-00	6E-01	1E-00**	1E-00	
ic	7E-02	1E-01	9E-02	8E-02	4E-02	7E-02	4E-02	2E-01	2E-02**	3E-02	1E-02	2E-02	
A	9E-02	1E-01	2E-01	1E-01	1E-01	1E-01	-2E-01	3E-01	2E-01	-2E-01	3E-01	2E-01	
B	-4E-03	-8E-03	-1E-02	-2E-02	-8E-03	-1E-02	9E-02	-5E-02	7E-02	2E-01	3E-02	-1E-02	
C	3E-04	5E-04	6E-04	1E-03	2E-03	1E-03	-3E-03	2E-03	-4E-03	-1E-02	6E-03	3E-03	
CMR	5E-01	5E-01	4E-01	6E-00	1E-01	2E-01	9E-01	7E-01	2E-02	8E-02	9E-02	2E-01	
S	4E-00	4E-00	5E-00	-3E-00	-1E-00	1E-00**	-5E-00	-4E-01	-5E-01	6E-01**	6E-01	7E-01	
ic	7E-02	1E-01	1E-01	8E-02	4E-02	7E-02**	4E-02	2E-01	2E-02	3E-02**	1E-02	2E-02	
A	1E-01	1E-01	1E-01	-8E-02	-1E-01	7E-02	-3E-01	-7E-02	-9E-02	2E-01	1E-01	2E-01	
B	9E-04	8E-03	8E-03	9E-02	1E-01	2E-02	1E-01	4E-01	4E-01	-2E-01	2E-01	5E-02	
C	-4E-04	-2E-03	-2E-03	-1E-02	-2E-02	-3E-03	-1E-02	-6E-02	-1E-01	1E-01	-7E-02	-9E-03	
D	3E-05	7E-05	1E-04	6E-04	1E-03	2E-04	2E-04	2E-03	1E-02	-5E-03	9E-03	7E-04	
CMR	5E-01	3E-01	3E-01	6E-00	1E-01	1E-01	8E-01	8E-02	6E-03	1E-01	9E-02	2E-01	
S	3E-00**	3E-00**	5E-00**	4E-00**	1E-00	2E-00	-5E-00	-2E-00	-1E-00	2E-00	2E-00	1E-00	
ic	8E-02**	1E-01**	9E-02**	8E-02**	4E-02	7E-02	3E-02	1E-01	2E-02	2E-02	1E-02	2E-02	
A	8E-02	1E-01	1E-01	1E-01	2E-01	1E-01	-3E-01	-2E-01	-2E-01	5E-01	3E-01	3E-01	
B	2E-02	2E-02	9E-03	9E-03	-1E-01	-2E-02	1E-01	5E-01	6E-01	-7E-01	-1E-01	-9E-02	
C	-3E-03	-3E-03	-3E-03	-3E-03	5E-02	5E-03	-8E-03	-2E-01	-2E-01	4E-01	1E-01	5E-02	
D	2E-04	2E-04	3E-04	3E-04	-7E-03	-6E-04	-3E-04	2E-02	3E-02	-9E-02	4E-02	-7E-03	
E	-5E-06	-3E-06	-7E-06	-6E-06	3E-04	3E-05	3E-05	-7E-04	-1E-03	6E-03	5E-03	4E-04	
CMR	3E-01	3E-01	3E-01	6E-00	1E-01	1E-01	7E-01	2E-02	6E-03	2E-01	1E-01	2E-01	

		Suelos No labrados											
		Mar del Plata				Azul				El Cruce			
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S*		2E-00	2E-00	2E-00	2E-00	3E-00	3E-00	3E-00	2E-00	2E-00	2E-00	1E-00	2E-00
ic*		2E-01	4E-02	-3E-02	1E-01	-5E-02	-5E-02	-4E-02	2E-02	-3E-02	-2E-02	-2E-02	-2E-02
CMR*		4E-00	2E-00	5E-01	2E-00	5E-01	5E-01	1E-00	4E-01	2E-00	3E-01	1E-01	2E-01
S		2E-00**	2E-00	2E-00	2E-00**	3E-00	3E-00	3E-00	2E-00	2E-00	2E-00	1E-00	2E-00
ic		2E-01**	4E-02	-3E-02	9E-02**	-5E-02	-5E-02	-4E-02	7E-02	-3E-02	-2E-02	-2E-02	-2E-02
A		6E-05	-2E-05	-2E-05	3E-03	1E-04	1E-04	4E-04	7E-02	6E-05	1E-04	1E-04	-1E-04
CMR		4E-00	2E-00	5E-01	3E-00	5E-01	5E-01	1E-00	3E-01	2E-00	3E-01	1E-01	2E-01
S		-3E-01	3E-01	6E-01	-2E-02	1E-00	2E-00	6E-01**	2E-00	-8E-01	1E-00	9E-01	1E-00
ic		2E-00	1E-01	5E-02	1E-01	4E-02	7E-02	9E-02**	9E-02	3E-02	1E-01	2E-02	5E-02
A		-2E-02	2E-02	5E-02	-9E-04	7E-02	9E-02	3E-02	1E-01	-6E-02	-2E-01	9E-02	1E-01
B		3E-02	2E-02	4E-02	2E-02	3E-02	3E-02	5E-02	3E-03	5E-02	2E-02	2E-02	2E-02
CMR		3E-01	1E-01	2E-01	2E-01	6E-02	1E-01	4E-01	4E-01	6E-02	1E-01	5E-02	1E-01
S		-1E-00	-1E-01	1E-02**	-6E-01	6E-01	1E-00	-6E-01	2E-00	-1E-00	2E-01	5E-01	6E-01
ic		2E-01	1E-01	6E-02**	2E-01	5E-02	7E-02	1E-01	1E-01	3E-02	5E-02	3E-02	6E-02
A		-7E-02	-6E-03	1E-03	-5E-02	4E-02	6E-02	-3E-02	1E-01	-1E-01	2E-02	6E-02	6E-02
B		5E-02	3E-02	7E-02	5E-02	4E-02	4E-02	8E-02	2E-02	7E-02	5E-02	4E-02	4E-02
C		-3E-03	-2E-03	-4E-03	-3E-03	-2E-03	-2E-03	-4E-03	-1E-03	-3E-03	-3E-03	-2E-03	-3E-03
CMR		1E-01	9E-02	1E-01	2E-01	4E-02	7E-02	2E-01	4E-01	3E-02	5E-02	3E-02	5E-02
S		-2E-00	-3E-01	-1E-00	-1E-00	-3E-02	7E-01**	-3E-00	-2E-00	-1E-00	4E-01	1E-01**	2E-01**
ic		3E-01	9E-02	5E-02	9E-02	4E-02	6E-02**	8E-02	1E-01	3E-02	-7E-02	2E-02**	4E-02**
A		-1E-01	-1E-02	-1E-01	-4E-02	-2E-03	3E-02	-1E-01	-1E-01	-8E-02	8E-03	1E-02	2E-02
B		9E-02	4E-02	1E-01	4E-02	8E-02	6E-02	1E-01	3E-01	6E-02	2E-02	6E-02	6E-02
C		-9E-03	-3E-03	-2E-02	-4E-03	-1E-02	-6E-03	-2E-02	-7E-02	-7E-04	-2E-03	-9E-03	-8E-03
D		2E-04	1E-04	1E-03	2E-04	7E-04	3E-04	9E-04	5E-03	-1E-04	8E-05	4E-04	4E-04
CMR		7E-02	1E-01	5E-02	4E-02	3E-02	8E-02	4E-02	2E-01	3E-02	5E-02	2E-02	4E-02
S		-2E-00	6E-01**	-2E-00	-1E-00	5E-01**	7E-01	-3E-00	3E-01**	3E-01**	1E-00**	-6E-02	3E-01
ic		2E-01	1E-01**	5E-02	9E-02	4E-02**	6E-02	7E-02	1E-01**	2E-02**	3E-02**	2E-02	7E-02
A		-7E-02	4E-02	-1E-01	-4E-02	2E-02	3E-02	-1E-01	7E-02	2E-02	6E-02	-5E-03	3E-02
B		5E-02	-1E-01	2E-01	4E-02	3E-02	6E-02	2E-01	1E-01	-5E-02	-2E-03	8E-03	7E-02
C		-9E-05	1E-02	-3E-02	-4E-03	-4E-03	-7E-03	-3E-02	-3E-02	3E-02	8E-03	-1E-02	-4E-03
D		-7E-04	-1E-03	2E-03	2E-04	7E-04	5E-04	7E-03	2E-03	-5E-03	-1E-03	1E-03	-2E-04
E		5E-05	3E-05	-3E-05	-8E-06	-4E-06	-1E-05	-5E-05	-2E-05	2E-04	5E-05	-3E-05	1E-05
CMR		5E-02	9E-02	5E-02	4E-02	4E-02	9E-02	3E-02	3E-01	9E-03	3E-02	23-02	5E-02

(*)Valores válidos para la ecuación de Philip (1957)
 ic: conductividad hidráulica saturada (cm · min⁻¹)
 S: sortividad (cm · min^{-0.5})
 A: parámetro de caracterización (min^{-0.5})

C: parámetros de caracterización (min^{-3/2})
 D: parámetros de caracterización (min⁻²)
 E: parámetros de caracterización (min^{-5/2})
 (**) valores retenidos de acuerdo al criterio de selección.

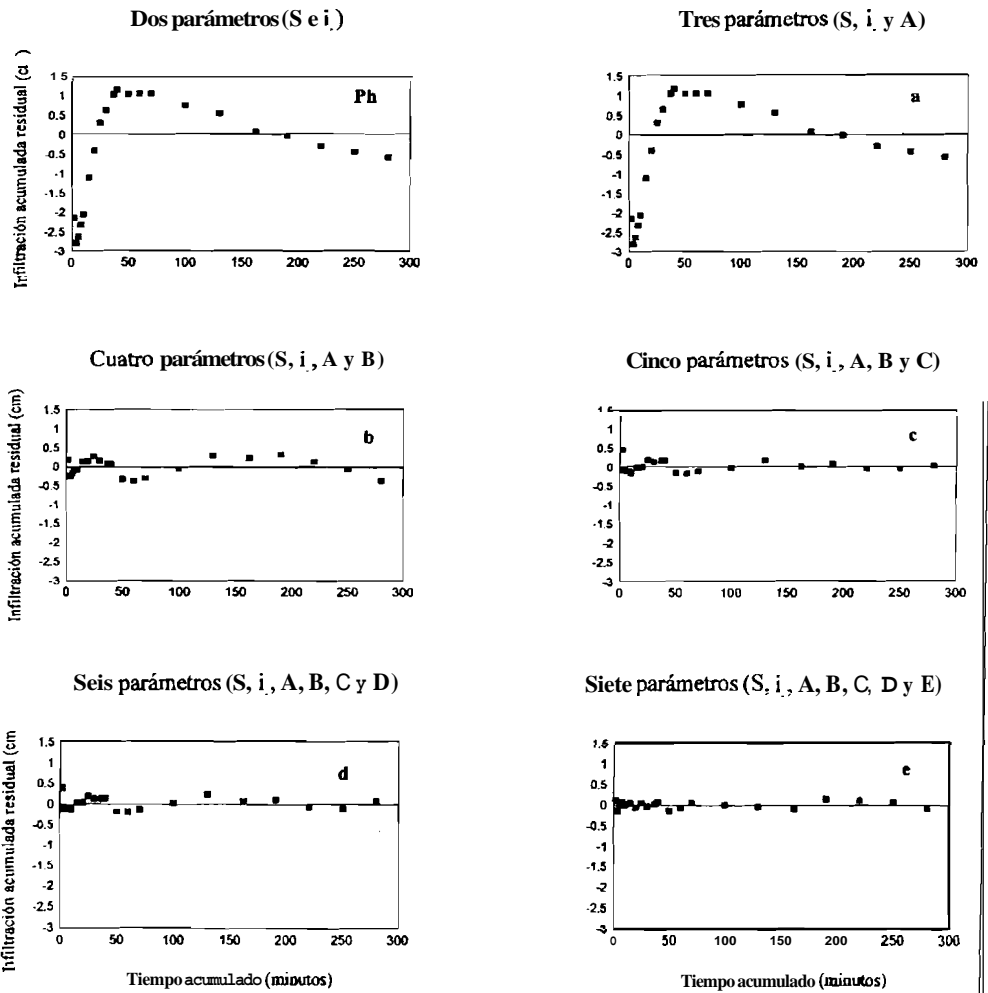


Figura 1. Distribución de los residuos de la infiltración acumulada ajustada del perfil 21 (Serie El Cruce no labrado) al aplicar los modelos de Philip (Ph) y Swartzendruber (a, b, c, d, e).

Tanto la ecuación de Philip (1957) como la de Swartzendruber reducida a su mínima expresión, las cuales son equivalentes (Swartzendruber 1987), presentaron uno o más de los siguientes inconvenientes:

Los parámetros S y/o i_c convergieron a valores negativos, los CMR fueron relativamente altos, y/o la distribución de los residuos fue sistemática. En cambio, al utilizar las ecuaciones que incluyen desde uno y hasta cinco coeficientes, el CMR del perfil 21 disminuyó progresivamente desde 1.9986

cm^2 a $0.0089 cm^2$. Sin embargo, hubo circunstancias en las cuales se obtuvieron valores negativos para S y/o i_c (Tabla 1). Aquí se hace evidente que la disminución del CMR no puede ser considerada condición *sine-qua-non* para seleccionar a un modelo como el más apto en describir la infiltración acumulada, demostrándose la necesidad de aplicar otro criterio de selección, por ejemplo el utilizado por los autores del presente trabajo (ver materiales y métodos).

La distribución de los residuos al aplicar la ecuación de Philip (1957) y las dos primeras y más sencillas expresiones del algoritmo general de Swartzendruber (1987), presentaron en los momentos iniciales del proceso de infiltración, hasta 50 minutos acumulados, valores negativos autocorrelacionados y cuantitativamente altos (Figura 1). Este comportamiento fue común en la totalidad de los sitios infiltrados, y bajo el supuesto que define la ecuación de dos términos de Philip, (la infiltración acumulada (I) es proporcional a $t^{1/2}$ cuando t tiende a cero, constante de proporcionalidad S , y la relación $\partial I / \partial t$ tiende a tomar un valor constante llamado K cuando tiende al infinito) es factible aseverar que en la mayoría de los casos esas ecuaciones sobrestiman S y consecuentemente subestiman i_c .

Ningún modelo con un número fijo de parámetros simuló adecuadamente la función I en todos los sitios infiltrados, ni tampoco a todas las repeticiones de un suelo bajo un uso en particular. Fueron necesarias distintas simplificaciones del algoritmo general de Swartzendruber (1987) con uno o más coeficientes para alcanzar dicho objetivo.

Dos importantes consecuencias surgieron cuando S e i_c se calcularon a partir

de modelos cuya bondad de ajuste fue evaluada aplicando el criterio de selección adoptado. En primer lugar se observó que a medida que los modelos presentan un mayor ajuste el sesgo que imprimen a los parámetros hidráulicos se va acotando (Figura 1). En segundo lugar y como consecuencia de lo anteriormente expresado, disminuye la variabilidad de i_c y aumenta la de S tendiendo a equipararse (Tabla 2 y 3).

El estudio de la normalidad a partir de los residuos permite aseverar que la distribución de frecuencia de K e i_c en los horizontes A es lognormal (Tabla 4). Las diferencias entre los valores de K e i_c dentro de un sistema de labranza en particular aplicando la metodología aquí empleada, no fueron estadísticamente significativas. El efecto método dentro de cada uso y para cada serie en particular se consigna en la Tabla 5, resultados que confirman que K e i_c pueden asumirse equivalentes si son calculados bajo los lineamientos aquí considerados independientemente del tipo de suelo y los sistemas de labranza comparados. Estos resultados además denotan considerables diferencias entre las magnitudes de K al comparar las diferentes series de suelos y sistemas de manejo.

Tabla 2. Coeficiente de validación porcentual de S e i_c y CMR promedio para cada nivel de tratamiento

Fórmulas	Parámetros	Labrados			No Labrados		
		Mar del Plata	Azul	El Cruce	Mar del Plata	Azul	El Cruce
Philip 1957	CV(%)S	10	31	36	7	14	11
	CV(%) i_c	111	120	84	110	100	22
	CMR (media)	5.25	0.95	0.33	2.01	0.68	0.64
Swartzendruber 1987	a.* CV(%)S	11	23	54	7	12	
	CV(%) i_c	31	57	26	112	307	22
	CMR (media)	3.22	0.89	0.13	2.08	0.70	0.64
	b. CV(%)S	32	39	33	256	48	135
	CV(%) i_c	21	36	13	50	27	58
	CMR (media)	2.32	0.75	0.11	0.18	0.24	0.08
	c. CV(%)S	10	374	95	101	120	5026
	CV(%) i_c	16	89	25	49	35	29
	CMR (media)	1.95	0.34	0.10	0.13	0.17	0.04
	d. CV(%)S	132	176	147	51	139	560
CV(%) i_c	14	62	27	74	37	609	
CMR (media)	1.75	0.27	0.10	0.06	0.09	0.04	
S	e. CV(%)S	17	282	133	97	398	96
	CV(%) i_c	12	45	17	51	40	54
	CMR (media)	1.81	0.26	0.14	0.06	0.11	0.03

S: sortividad. i_c : infiltrabilidad final. CMR: cuadrado medio residual promedio (cm). (*) parámetro incorporado al algoritmo inmediato superior. CV(%)S: coeficiente de variación porcentual de la sortividad. CV(%) i_c : coeficiente de variación porcentual de la conductividad hidráulica saturada.

Tabla 3. Coeficiente de variación porcentual de S e ic y CMR promedio para cada nivel de tratamiento al aplicar el criterio de selección preestablecido.

	Labrados			No Labrados		
	Mar del Plata	Azul	El Cruce	Mar del Plata	Azul	El Cruce
CV(%)S	18	38	29	32	24	47
CV(%)ic	12	16	29	40	39	24
CMR (media)	1.75	0.72	0.09	1.60	0.20	0.03

S: sortividad. ic: infiltrabilidad final. CMR: cuadrado medio residual promedio (cm). CV(%)S: coeficiente de variación porcentual de la sortividad. CV(%)ic: coeficiente de variación porcentual de la conductividad hidráulica saturada.

Tabla 4. Significancia del modelo general y sus fuentes de variación. Coeficiente de determinación múltiple y de variación porcentual. Normalidad y homogeneidad de varianza de residuos.

Variable	Modelo General			Fuentes de Variación					Supuestos	
	Significancia General	R	V	Suelo	Uso	Mdo(Us)	Suelo x uso	Suelo x Mdo (uso)	Normalidad	Homogeneidad de varianza
K e ic del honwnte A	***	0.7234	83.63	***	**	NS	NS	NS	*	sesgada
K e ic del Hz A (log 10)	***	0.7757	13.22	***	**	NS	NS	NS	*	no sesgada

ic: infiltrabilidad final. K: conductividad hidráulica saturada. R: coeficiente de determinación múltiple. CV: coeficiente de variación porcentual. Mdo: método. log 10: transformación logarítmica. NS: no significativo. *: Significativo al 0.05. **: Significativo al 0.01. ***: Significativo al 0.001. ---: Interacción significativa.

Tabla 5. Comparación entre las medias ajustadas por mínimos cuadrados para el flujo de agua saturado en los horizontes A, calculado a partir de la infiltración acumulada

	Labrados			No Labrados		
	Mar del Plata	Azul	Serie 15	Mar del Plata	Azul	Serie 15
Campo	1.74 <i>b</i>	1.58 <i>c</i>	1.03 <i>e</i>	1.81 <i>a</i>	1.63 <i>b</i>	1.23 <i>d</i>
Laboratorio x	1.65 <i>b</i>	1.49 <i>c</i>	1.09 <i>e</i>	1.86 <i>a</i>	1.68 <i>b</i>	1.26 <i>d</i>
Laboratorio y	1.67 <i>b</i>	1.48 <i>c</i>	1.17 <i>e</i>	1.87 <i>a</i>	1.68 <i>b</i>	1.25 <i>d</i>

Letras distintas indican diferencias significativas al 5% entre el logaritmo decimal del flujo de agua saturado (mm*h⁻¹). Laboratorio x: orientación de lamuestra no disturbada, paralela a la superficie del terreno. Laboratorio y: orientación de lamuestra disturbada, perpendicular a la superficie del terreno.

DISCUSION

Dados los CMR, la magnitud y distribución de los residuos y los eventuales valores negativos a los que convergieron S y/o i_c al utilizar la ecuación de Philip (1957) y los dos primeros y más sencillos modelos de Swartzendruber (1987), se deduce que la precisión y exactitud con que simulan a la curva I medida en el campo, son al menos cuestionables.

La falta de ajuste se debe a que al eliminar las series de potencias y los coeficientes B , C , D , E ,... N de las ecuaciones generales de Philip y Swartzendruber respectivamente, los algoritmos resultantes no describen las formas de las curvas I registradas en el campo. Según Hillel (1982), la supresión de las series de potencias se justificaría, pues su aporte al describir la curva I es despreciable por que toman valores cercanos a cero. Este supuesto, implícito en los modelos con dos parámetros, no puede ser asumido en los suelos estudiados. De acuerdo a los resultados obtenidos, el flujo de infiltración transitorio no es bien descrito por una función descendente tan sólo asociada a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido.

Esta afirmación concuerda con lo publicado por Ali y Swartzendruber (1994). Ellos reportan que los modelos más aptos para simular I implican relaciones entre el flujo de agua transitorio y el tiempo transcurrido que son más complejas que la establecida por la ecuación de dos términos de Philip. Esto significa que los coeficientes A , B , C , D , E ,... N no son siempre despreciables y por consiguiente la ecuación de dos términos de Philip sólo describe correctamente en términos cualitativos la forma exponencial negativa que caracteriza a la curva I .

Swartzendruber y Clague (1989) y Ali y Swartzendruber (1994) mencionan que los coeficientes A , B , C , ... N del algoritmo general de Swartzendruber (1987) poseen interpretación física, indicando que su significado sería discutido en publicaciones posteriores. No habiendo sido publicada dicha interpretación, se les ha asignado a

estos coeficientes la propiedad de representar el número de términos necesarios para simular cuali y cuantitativamente la forma que adquiere la curva de infiltración acumulada en un sitio en particular durante un periodo de tiempo acotado.

Ningún modelo con un número constante de coeficientes simuló adecuadamente a todas las curvas I registradas a campo, ni siquiera a las repeticiones de un suelo bajo un uso en particular. Sin embargo, con el criterio de selección adoptado se pudo simular con mayor precisión y exactitud la infiltración acumulada e i_c , reduciéndose la variabilidad de su valor en un suelo bajo un uso en particular. Estos resultados permiten conjeturar que no existe una función exponencial única que permita simular I en todos los sitios. Además, las diferencias entre las simplificaciones del algoritmo general de Swartzendruber (1987) se encuentran en el término que representa al flujo de agua transitorio, por lo tanto podemos precisar que es la evolución de éste, la que no es descripta unívocamente por alguna de las ecuaciones matemáticas probadas.

Según Hillel (1982), la sortividad representa el efecto que ejercen la succión mátrica y la conductividad sobre el flujo de infiltración transitorio, parámetro que depende entre otros factores, del contenido de humedad inicial del suelo. En este trabajo el efecto que la humedad inicial del suelo ejerce sobre la magnitud de la sortividad no se discute, ya que la finalidad es determinar la precisión y exactitud con que los modelos la simulan.

Sin embargo, los desvíos a una función proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido que la evolución del flujo de agua transitorio ha presentado, tanto entre sitios como dentro de un sitio, podrían ser explicados debido a la ausencia de rigidez de la matriz del suelo y a las características de las fuerzas de tensión que generan a la succión mátrica.

La primera razón debe ser considerada debido a que el diseño del espacio poroso del suelo depende

directamente de la estructura (Quirck, Murray 1991), cuyas unidades pedológicas constitutivas en los diferentes niveles de estructura difieren en composición, diseño y ordenamiento (Brewer 1964). Debido a que la expansibilidad y el momento en el cual ésta se manifiesta son diferentes para los distintos componentes físicos, químicos y biológicos que constituyen la matriz, el diseño del espacio poroso se modificaría diferencialmente durante el período de hidratación en cada tipo de suelo, o inclusive, entre los distintos sitios de muestreo para un suelo bajo alguno de los sistemas de labranza probados. Esto permitiría explicar desde el punto de vista pedológico el por qué la evolución del flujo de agua transitorio difiere tanto entre suelos como entre algunas repeticiones de éstos. Dada esta característica de la matriz del suelo, las fuerzas de tensión que generan la succión mátrica poseen un comportamiento particular. En tal sentido, Philip (Hillel 1982) describe el concepto de sortividad intrínseca, concepto que toma en cuenta los efectos que ejercen sobre la succión de un suelo, la viscosidad y tensión superficial del fluido. Según el autor, tanto la viscosidad del fluido como la tensión superficial a la cual está sujeta el mismo, no son necesariamente equivalentes en suelos semejantes. Quizás la viscosidad del fluido pueda asumirse constante durante el período de toma de datos, y por consiguiente su efecto despreciable. En cambio, el efecto de la tensión superficial no lo sería pues existen diferencias en la composición y el arreglo de las unidades pedológicas que constituyen la estructura del suelo. Según Drees et al. (1994), los suelos no labrados poseen inmediatamente por debajo de la superficie estructura platiforme, poros finos interconectados y abundantes poros de empaquetamiento mezclados con cámaras y canales que generan una red horizontal y vertical ininterrumpida de espacios vacíos. En cambio, los suelos labrados presentan una estructura subangular fragmentada y unidades estructurales de gránulos separadas por poros de empaquetamiento, observándose menos evidencias de actividad biológica. Por lo

tanto, el total de las fuerzas que establecen a la tensión superficial o succión en distintos pedones, no son necesariamente equivalentes. Más recientemente Lu et al. (1994a) observaron experimentalmente que el ascenso capilar y el fenómeno de histéresis, en poros medios generados por esferas de vidrio, no pueden explicarse adecuadamente utilizando los modelos del cilindro e "ink-bottle" respectivamente. A partir de una cámara de televisión conectada a un microscopio, registraron el ascenso del líquido a través de los poros medios generados por diferentes arreglos de partículas empaquetadas, simulando de este modo el arreglo de los agregados en el suelo. Dicho ascenso exhibió un comportamiento a saltos ("jump behavior"), si la condición inicial del dispositivo era de sequedad; mientras que si el estado inicial del espacio poroso poseía cierto grado de humedad, al comportamiento a saltos se le debía agregar un engrosamiento de las láminas de agua preexistentes en ciertos sectores de las paredes de los poros. Esto disminuye la intensidad del comportamiento a saltos que el líquido exhibe durante el ascenso capilar. Dos importantes precisiones surgen de estas observaciones. Primero, si la humedad inicial en los espacios porosos generados por apilamiento de partículas esféricas es nula, el frente de humectación es neto y platiforme y el flujo de agua en dicho lugar es cuasi-saturado. En cambio, cuando existe cierto grado de humedad inicial, el frente de humectación es irregular donde el flujo de agua es no saturado (Lu et al. 1994b). Segundo, si el ascenso capilar es perturbado por vibraciones o pequeños cambios en la superficie del agua libre que lo abastece, este puede detenerse y recomenzar a partir de una condición previa de cuasi-equilibrio (Lu et al. 1995). Esto significa que las fuerzas de superficie que actúan en el punto de contacto en la interfase gas - líquido son cambiantes en magnitud y dirección, contrastando con lo que ocurre en tubos capilares donde son constantes.

Los cambios en la magnitud y dirección que la evolución del flujo de agua transitorio ha presentado en los horizontes

superficiales de los suelos estudiados, concuerda con lo expuesto en el párrafo anterior, y debido a que el espacio poroso de menor tamaño en dichos horizontes resulta del ordenamiento que adquieren partículas empaquetadas que constituyen agregados pseudoesferoidales (Brewer 1964), es factible aplicar los conceptos vertidos por Lu et al. (1994 a y b y 1995) para explicar el comportamiento de la evolución del flujo de agua transitorio. De este modo, los coeficientes A, B, C, ... N de la ecuación de Swartzendruber se interpretarían físicamente como el efecto que causan sobre la succión mátrica de un suelo, aquellos cambios que ocurren en la magnitud y dirección de la tensión superficial durante el período de lihidratación. Esta característica que es intrínseca de los espacios porosos generados por partículas esferoidales, en el caso particular de los suelos estudiados es influenciada por los constituyentes de la matriz y por cambios en el diseño del espacio poroso durante el período de hidratación debido a la expansibilidad diferencial que poseerían las distintas unidades de organización pedológica.

CONCLUSIONES

La ecuación de dos términos de Philip en los suelos estudiados sobrestima la sortividad y subestima la infiltrabilidad final a 240 minutos. Por lo tanto no es apta para estimar S e i_c .

Los coeficientes A, B, C, .. N, de la ecuación de Swartzendruber pueden interpretarse físicamente como el efecto que causan sobre la succión mátrica de un suelo los cambios de magnitud y dirección en la tensión superficial.

La magnitud y dirección de la evolución de la sortividad en los suelos estudiados son variables debido a que el comportamiento de la succión responde a los principios físicos que controlan la tensión superficial en los espacios porosos generados por el aplilamiento de partículas esferoidales.

Los valores de S e i_c estimados bajo los lineamientos considerados, representan con mayor veracidad la cantidad de agua que

es infiltrada al tiempo t por cada uno de los procesos simulados, sortividad e infiltrabilidad final a 240 minutos.

Las magnitudes de los parámetros K e i_c a 240 minutos en los horizontes A de los suelos estudiados pueden asumirse equivalentes cuando son obtenidas bajo los conceptos aquí empleados.

REFERENCIAS

- Ali A, Swartzendruber D. 1994. An infiltration equation to assess cropping effects on soil water infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1218-1223
- Bouwer H. 1986. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph N° 9, 2nd Edition. Ed. A. Klute. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 5371 1, USA. 825-844
- Brewer R. 1964. Structure and fabric analysis. In: *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. John Wiley and Sons, Inc. NY. 127-176
- Brutsaert W. 1977. Vertical infiltration in dry soil. *Water Resour. Res.* 13: 363-368
- Cabria FN, Culot J Ph. 1994. Selección y utilización de características edáficas para discriminar series de Argiudoles en el Sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo.* 12: 41-55
- Dabney SM, Selim HM. 1987. Anisotropy of fragipan soil: Vertical vs. horizontal hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:3-6
- Drees LR, Karathanasis AD, Wilding LP, Blevins RL. 1994. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 508-517
- Driessen, PM. 1986. The water balance of soil. In: *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Eds. H. van Keulen and J. Wolf. Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, the Netherlands. 76-116
- Hillel D. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press Inc. 1250 Sixth Avenue, San Diego, California 92101. 364p.
- Horton R E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5: 399-417

- INTA, SAGyP, Instituto de Clima y Agua. 1995. Boletín Agrometeorológico. Región Pampeana. Diciembre.
- INTA, SAGyP, Instituto de Clima y Agua. 1996. Boletín Agrometeorológico. Región Pampeana. Marzo.
- Klute A, Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Ed. A. Klute. *Methods of Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph N° 9, 2nd Edition. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 687-734
- Lu TX, Biggar JW, Nielsen DR. 1994 a. Water movement in glass bead porous media. 1, Experiments of capillary rise and hysteresis, *Water Resour. Res.* 30:12. 3283-3290
- Lu TX, Biggar JW, Nielsen DR. 1994b. Water movement in glass bead porous media, 2, Experiments of infiltration and finger flow, *Water Resour. Res.* 32:12. 3275-3281
- Lu TX, Nielsen DR, Biggar JW. 1995. Water movement in glass bead porous media, 3, Theoretical analyses of capillary rise into initially dry media, *Water Resour. Res.* 31:1. 11-18
- Mead R, Cumow RN, Hasted AM. 1993. Non-Linear models. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*, 2nd Edition. Chapman & Hall. 29 West 35th Street. New York NY 10003, USA. 247-276
- Parlange JY. 1975. A note on the Green and Ampt equation. *Soil Sci.* 119: 466-467.
- Parlange JY, Lisle I, Braddock RD, Smith RE. 1982. The tree-parameter infiltration equation. *Soil Sci.* 133: 337-341
- Philip JR. 1957. The theory of infiltration. 4. Sortivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84: 257-264
- Philip JR. 1969. The theory of infiltration. *Soil Sci.* 84: 329-339
- Philip, J.R. 1974. Recent progress in the solution of nonlinear diffusion equations. *Soil Sci.* 117: 257-264
- Quirk J P, Murray RS. 1991. Towards a model for soil structural behaviour. *Aust. J. Soil Res.* 29: 829-867
- SAS Institute. 1988. *SAS/STAT user's guide*. Version 6.06 ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy: A basic system for marking and interpreting soil surveys*. SCS. USDA. Agric. Hand. N° 436. P.O. Box 2890. Washington, D.C. 20013. 754p.
- Soil Survey Staff. 1994. *Keys to Soil Taxonomy*. Sixth Edition. SCS, USDA. P.O. Box 2890. Washington, D.C. 20013. 305p
- Swartzendruber, D. 1987. A quasi-solution of Richards' equation for the downward infiltration of water into soil. *Water Resour. Res.* 23: 809-817
- Swartzendruber, D. 1993. Revised attribution of the power form infiltration equation. *Water Resour. Res.* 29: 2455-2456
- Swartzendruber, D, Clague FR. 1989. An inclusive infiltration equation for downward water entry into soil, *Water Resour. Res.* 25: 619-626.