

Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias

Aoki, A. M. y R. Sereno

RESUMEN

Los simuladores de lluvia son usados desde hace tiempo en investigaciones sobre erosión y escurrimiento. Este trabajo tuvo por objetivos: 1) evaluar comparativamente la infiltración, medida mediante microsimulador de lluvias, como indicador de calidad de suelo, 2) comparar y seleccionar ecuaciones que describan adecuadamente el proceso de infiltración. Los ensayos se realizaron sobre un suelo Haplustol típico de textura franco limosa, ubicado en la región central de la provincia de Córdoba, Argentina. Se seleccionaron tres sitios de ensayo: una situación testigo que corresponde a un suelo bajo bosque nativo y dos correspondientes a un suelo en el que se realizó monocultivo de soja con labranza convencional. Se aplicaron distintas intensidades de lluvia simulada. Se comparó el ajuste estadístico de los datos experimentales a dos ecuaciones: Philip y Horton. Se observó que: 1) la velocidad final del proceso de infiltración se comporta como un indicador de calidad de suelo válido para detectar diferencias significativas en las propiedades del horizonte superficial de un suelo Haplustol típico, en condiciones de bosque nativo y en un agroecosistema manejado con labranza convencional; y 2) la ecuación de Horton describe mejor que la de Philip el proceso de infiltración de agua para el suelo y condiciones bajo estudio.

Palabras clave: microsimulador de lluvias, calidad de suelo, suelo Haplustol típico, infiltración.

Aoki, A. M. y R. Sereno, 2006. Evaluation of infiltration as soil quality indicator by a micro rainfall simulator. *Agriscientia* XXIII (1): 23-31.

SUMMARY

Rainfall simulators have been used for the last twenty years in erosion and runoff research. This paper had two goals: 1) to comparatively evaluate the infiltration as soil quality indicator using a rainfall micro simulator; and, 2) to compare and choose the equations that adequately fit the infiltration process. The assays were made on a typical Haplustol soil with silty loam texture situated in the Central Region of Cordoba Province. Three test sites were selected: a witness site under native forest and two corresponding to soils under soybean monoculture and con-

Fecha de recepción: 21/03/06; fecha de aceptación: 26/07/06

ventional tillage. Several simulated rain intensities were applied. The statistical fitting of experimental data was compared to two equations: Philip and Horton. The following was observed from field measurements: 1) the final velocity of the infiltration process is a valid quality soil indicator to detect significant differences between superficial horizon conditions of a typical Haplustol soil in a native forest and in a conventional tillage agroecosystem; and, 2) the Horton equation describes the water infiltration process for the soil and conditions of this study better than the Philip equation

Key words: micro rainfall simulator, soil quality, typical Haplustol soil, infiltration.

A. M. Aoki y R. Sereno. Grupo de Gestión Ambiental de Suelos y Agua, Facultad de Ciencias Agropecuarias, U.N.C. Av. Valparaíso s/n, Ciudad Universitaria, CC 509 (5000), Córdoba, Argentina. aaoki@agro.uncor.edu

INTRODUCCIÓN

La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial del impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, condujo al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos que tratan de simular la lluvia natural (Pla Sentis, 1981; Rostagno y Garayzar, 1995; Achutegui *et al.*, 1996).

Los simuladores de lluvia son usados desde hace tiempo en investigaciones sobre erosión y escurrimiento, a campo y en laboratorio (Bryan & Ploey, 1983). Pla Sentis (1981) expresa que los simuladores de lluvia permiten realizar estudios sobre las interacciones suelo-lluvia, tanto a campo como en laboratorio. Según Slatter & Bryan (1992), los dispositivos que aplican agua en forma de gotas, son instrumentos válidos para observar el efecto de las lluvias como generador de costras o sellos superficiales. Esto es particularmente importante si consideramos que dentro de la gama de impactos ambientales generados por las tecnologías utilizadas en la región central de la provincia de Córdoba, el deterioro de la condición superficial de los suelos, reflejado en la formación de costras, influye decisivamente en el sistema productivo (Bricchi *et al.*, 1996). Tanto las condiciones de superficie, como la posibilidad de generar costras o sellos, son modificadas por las labranzas (Marelli y Arce, 1995), siendo extremos de la escala el comportamiento de la infiltración de un suelo no trabajado y uno sometido a laboreo intenso. En este sentido, Cisneros *et al.* (1997) evaluaron el grado de deterioro de algunas propiedades físicas (densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, velocidad de infiltración, resistencia mecánica, entre otras) de un suelo Ha-

plustol típico sin uso agrícola ni ganadero y uno bajo agricultura continua. Esta evaluación mostró que los suelos analizados presentaban un grado relativo de alteración de las variables estudiadas entre el 85 y 90%, es decir muy próximos a la degradación máxima posible.

Dentro de la amplia variedad de simuladores de lluvia interesa destacar a los micros simuladores. Éstos son particularmente adecuados para relevamientos de suelos debido a que son livianos para transportar y fáciles de manejar a campo (Kamphorst, 1987; Meyer, 1994). Son instrumentos expeditivos que permiten evaluar en el terreno la infiltración, el escurrimiento, las pérdidas de suelo correspondiente a lluvias simuladas de lámina total con intensidad y energía conocidas, en distintas condiciones de pendiente, roturación y cobertura de suelo (Iruetia y Mon, 1994).

Los datos obtenidos a partir de ensayos con simulador de lluvia permiten describir, mediante distintos modelos o ecuaciones, el proceso de infiltración de agua en el suelo. Así, por ejemplo, Osuma Ceja y Padilla Ramírez (1998) estimaron la sortividad e infiltración de agua en tres tipos de suelos de la zona semiárida de México usando datos de simulación de lluvia.

Sin embargo, las ecuaciones "clásicas" para estimar infiltración (Green Ampt, Richards, Kostiaikov, Philip) con las que se diseñan modelos hidrológicos, tanto de riego como de drenaje, están normalmente basadas en pocas o ningunas consideraciones de los efectos de la lluvia y las labranzas (Mwendera & Feyen, 1993). De acuerdo a Klute (1982), existen algunas dificultades cuando se aplican las ecuaciones tradicionales en la modelización de la infiltración en suelos cultivados, donde se asumen como

constantes valores que se van modificando, tales como la permeabilidad, la porosidad o la estructura superficial.

Por otra parte, cambios en la velocidad de infiltración fueron descritos como funciones exponenciales del tiempo (Parr & Bertrand, 1960) o de la lluvia acumulada (Mwendera & Feyen, 1993). También Eigel & Moore (1983) mostraron que el decaimiento de la infiltrabilidad en superficies desnudas puede ser relacionado con la energía cinética acumulada o el volumen de lluvia a través de una función exponencial. Roth & Eggert (1994) utilizaron una ecuación exponencial similar a la de Horton (1940) para explicar la susceptibilidad al sellado superficial en función de la energía cinética de la lluvia.

De acuerdo a estos antecedentes se plantearon los siguientes objetivos: 1) evaluar comparativamente la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias, bajo condición de bosque nativo y en sitios de ensayo contrastantes de un agroecosistema bajo monocultivo de soja, 2) comparar y seleccionar ecuaciones que describan adecuadamente el proceso de infiltración de agua en el suelo para las condiciones del presente trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y descripción del área de ensayo

Los ensayos se realizaron en un establecimiento ubicado a 25 km al sur de la ciudad de Córdoba (31°19' S; 64° 13' W), Argentina. El clima del área en estudio es semiárido, con alrededor de 700 mm de precipitación anual e inviernos secos. El área estudiada se considera representativa de unas 20.000 ha afectadas por erosión hídrica (Zamora y Jarsun, 1985).

El suelo es un Haplustol típico de textura franco limosa, con la siguiente secuencia de horizontes: Ap (0-14 cm), A2 (14-20 cm), Bw (20-40 cm), BC (40-60 cm), C (60-84 cm), Ck (+84 cm). La pendiente del terreno es uniforme y ligeramente superior al 1%, no obstante existen pequeñas variaciones locales que originan irregularidades en el terreno (Romero *et al.*, 1995).

Selección y caracterización de los sitios de ensayo

Se seleccionaron tres sitios para los ensayos: una situación testigo que corresponde a un suelo bajo bosque nativo (BN) y otras dos situaciones correspondientes a un suelo con monocultivo de soja bajo labranza convencional, en sentido perpendicular

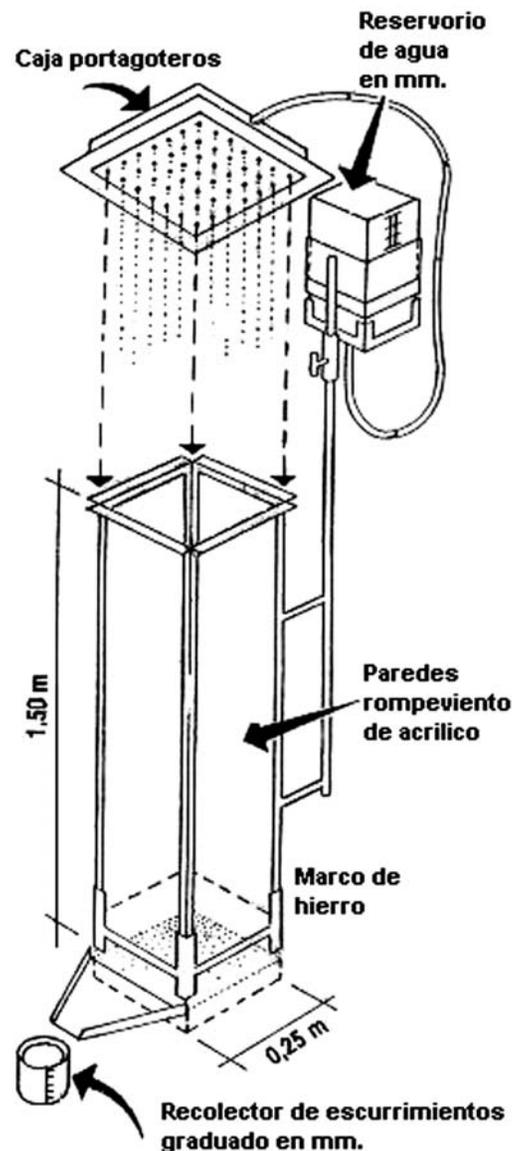


Figura 1. Esquema básico del microsimulador de lluvias (de Iruirtia y Mon, 1994)

a la pendiente. Estos últimos se diferenciaron entre sí por estar localizados en dos ambientes contrastantes de una microcuenca de 9,3 ha. Uno se encuentra en la parte topográficamente más baja (C7), y corresponde a una situación de alta humedad, mientras que el otro está ubicado en un área intermedia (E3), con baja humedad, sin que exista entre ambos sitios asociación espacial (Romero *et al.*, 1995). La Tabla 1 muestra las características del horizonte superficial de los sitios de ensayo.

Tabla 1. pH, densidad aparente, porosidad total, materia orgánica, porcentaje de arena, limo y arcilla e índice de agregación de los tres sitios de ensayo de 0-20 cm de profundidad.

	Sitios de ensayo ¹		
	E3	C7	BN
Profundidad, cm	0-20	0-20	0-20
pH	6,53 ^a	6,55 ^a	5,86 ^b
Densidad aparente, mg m ⁻³	1,25 ^a	1,19 ^a	1,04 ^b
Porosidad total ²	0,528 ^a	0,551 ^a	0,607 ^b
Materia orgánica, g kg ⁻¹	19,6 ^a	27,1 ^b	37,6 ^c
Arena, %	23,7	19,4	16,9
Limo 20-50 μm, %	31,9	27,8	27,3
Limo 2-20 μm, %	24,3	30,7	28,9
Arcilla, %	11,25	13,55	13,19
Índice de agregación ³	29,8 ^a	38,0 ^b	65,0 ^c

¹ Valores seguidos de letras distintas difieren significativamente (P<0,05)

² Valores estimados a partir de la densidad aparente.

³ Índice de agregación realizado con muestras compuestas.

Mediciones en los sitios de ensayo

Simulador de lluvias utilizado

Se trabajó con un microsimulador de lluvias portátil cuya estructura básica fue diseñada en el Instituto de Suelos del CIRN-INTA (Irrutia y Mon, 1994) y posteriormente modificado para adaptarlo a las situaciones experimentales (Aoki y Sereno, 1999).

En su forma básica el microsimulador es un prisma cuadrado de 1,5 m de alto y 0,25 m de base (Figura 1). La estructura es de hierro en ángulo, que sostiene las paredes de acrílico transparente, que actúan como rompevientos. El peso total del aparato es 8 kg. En la parte superior se apoya una caja porta goteros de acrílico, en cuya base se encuentran 49 tubos plásticos formadores de gotas. Esta caja tiene una alimentación de agua, proveniente de un reservorio colocado en una de las aristas de la estructura. El reservorio está graduado en mm de lámina aplicados en la microparcela. A su vez, la base del reservorio se puede variar de altura, con lo que variará la intensidad de lluvia. Las gotas que se forman tienen diámetros promedios del orden de 4,7 mm. Epema & Riezebos (1984) midieron, para distintas alturas de caída, la velocidad de impacto de gotas de distintos diámetros y obtuvieron, para gotas de 4,5 mm de diámetro que caen de una altura de 1,50 m, una velocidad final de 5,04 m s⁻¹. Con este valor la energía cinética de esa gota será de 6,35 x 10⁻⁴ Joules y la energía generada por el microsimulador de 12,7 kJ m⁻² m⁻¹, lo que equivale al 32,6% de la energía de la lluvia natural (Irrutia y Mon, 1994).

En posición de trabajo el aparato se fija a un marco de hierro, previamente clavado en el suelo. Es-

te marco es el que delimita la microparcela donde se hace la medición y tiene 0,25 m de lado y 0,12 m de altura. Por uno de los costados, con forma de vertedero, se recibe el escurrimiento en un recipiente graduado en mm. El cálculo del agua infiltrada se hace por diferencia entre el agua aplicada y el agua escurrida en distintos intervalos de tiempo.

Con este dispositivo se aplicaron lluvias de intensidad constante entre 15 a 130 mm h⁻¹ para cada sitio de ensayo.

Las mediciones de infiltración con simulador de lluvia se efectuaron con agua destilada y sobre suelo en el que previamente se limpió la cobertura de rastrojos, durando estas mediciones entre 1 y 2 h (White & Sully, 1987).

Las simulaciones de lluvia se realizaron bajo dos antecedentes de humedad: después de un período de sequía (w% = 6-10,6), en donde los valores fueron cercanos al punto de marchitez permanente, y en un período húmedo (w% = 13,3-19,6), después de la ocurrencia de lluvias.

Métodos de análisis de humedad del suelo

La humedad edáfica se midió gravimétricamente en cada repetición, antes y después de cada medición, y se afectó por la densidad aparente para obtener el valor de humedad volumétrica. La primera evaluación tuvo por objeto asegurar la uniformidad de las condiciones de humedad antecedente, mientras que la segunda sirvió para verificar el pasaje uniforme del agua a través del perfil edáfico.

Descripción del proceso de infiltración de agua en el suelo

Se utilizaron dos ecuaciones de infiltración (Horton, 1940; Philip, 1957), provocando el ajuste estadístico de los datos experimentales de infiltración a éstas a partir del momento en que el exceso de agua apareció en la superficie del suelo. Luego se procedió a comparar cual de las dos ecuaciones describió mejor el proceso de infiltración para las condiciones bajo estudio.

Ecuación algebraica desarrollada por Philip (1957):

$$i = 1St^{1/2} + A \quad \text{Ecuación 1}$$

2

En donde: i = velocidad de infiltración; t = tiempo; S = sortividad; A = parámetro de infiltración relacionado con la infiltración final;

y

Ecuación exponencial de Horton (1940):

$$i = i_f + (i_i - i_f)e^{-(\beta \cdot t)} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde: i = velocidad de infiltración que varía entre i_i e i_f ; i_f = velocidad de infiltración final; i_i = velocidad de infiltración a $t = 0$, o inicial; β = tiempo al cual $i - i_f$ disminuyó al 36,8% de su variación total ($i_i - i_f$); t = tiempo transcurrido desde saturación superficial del suelo.

En muchos casos la bibliografía (Mwendera & Feyen, 1993; Roth & Eggert, 1994) caracteriza al factor exponencial como lluvia acumulada o energía de lluvia, factores que están estrechamente relacionados con el tiempo, en la medida que la intensidad de la lluvia es constante.

Si no existiese el efecto del aire aprisionado en el interior del suelo dificultando la infiltración, los parámetros A e i_f serían iguales a la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}). Debido a la existencia de dicho efecto, normalmente, A e i_f son menores a K_{sat} (Da Silveira *et al.*, 1993).

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño multifactorial completamente aleatorizado con tres repeticiones por tratamiento. Los factores estudiados fueron: sitio, intensidad de lluvia simulada y humedad antecedente, con 3, 4 y 2 niveles respectivamente.

Las variables estudiadas fueron las de la ecuación que describe el proceso de infiltración de agua en el suelo. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza y se usó *a posteriori* la prueba de Ryan, Einot, Gabriel y Welch (REGWQ) para encontrar diferencias entre tratamientos (SAS Institute, 1989).

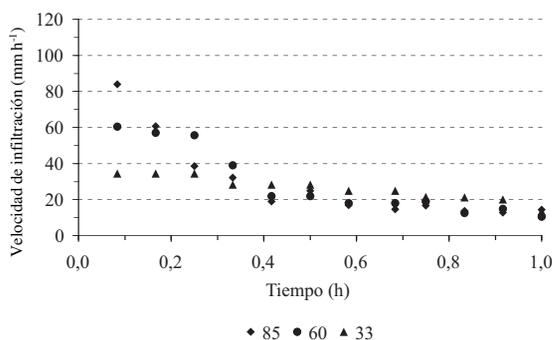


Figura 2. Valores experimentales de la velocidad de infiltración en el tiempo para el sitio de ensayo E3 con una intensidad de lluvia simulada de: a) 85 mm h⁻¹, b) 60 mm h⁻¹ y c) 33 mm h⁻¹. Humedad antecedente: baja.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la velocidad de infiltración en los ensayos realizados en campo

Las Figuras 2 y 3 describen los patrones de comportamientos de la velocidad de infiltración en el tiempo medidos en diferentes ensayos realizados a campo. Este comportamiento puede subdividirse, para intensidades menores a 60 mm h⁻¹, en tres segmentos diferenciados en el tiempo: una primera etapa en donde la velocidad de infiltración permanece constante, una segunda etapa en donde los valores caen rápidamente y una tercera etapa de estabilización final de las medidas. También puede observarse que la primera etapa se prolonga en el tiempo medida que desciende la intensidad de la lluvia simulada.

Potter *et al.* (1995) trabajando con Vertisoles, también observaron en todas las combinaciones residuo/labranza, que la infiltración de agua sobre el suelo seco tenían un patrón con una tasa inicial constante muy larga, seguido por una rápida declinación para llegar, en la mayoría de los casos, a una tasa de infiltración baja y casi constante. En coincidencia con otros autores, estos investigadores notaron la importancia de esa "infiltración inicial" en la recarga del perfil, determinando que una gran proporción de la infiltración de agua ocurre antes de que se inicie el escurrimiento.

Los valores medios observados de infiltración final para los sitios dentro de la microcuenca (C7 y E3), fueron 15 ± 4 mm h⁻¹ cuando el perfil está en condiciones más secas (Figura 2, 3) y 12 ± 3 mm h⁻¹ cuando está más húmedo. Estos valores son similares en cuanto al orden de magnitud a los determinados por Marelli y Arce (1995) quienes, utilizando simulador

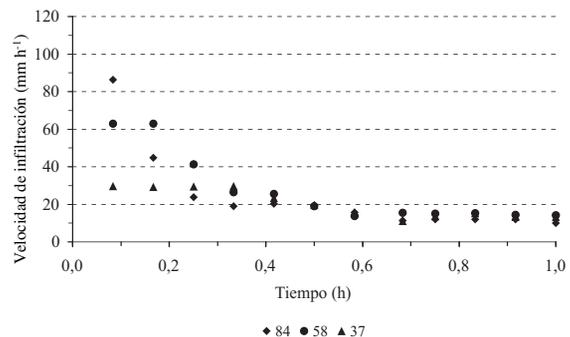


Figura 3. Valores experimentales de la velocidad de infiltración en el tiempo para el sitio de ensayo C7 con una intensidad de lluvia simulada de: a) 84 mm h⁻¹, b) 58 mm h⁻¹ y c) 37 mm h⁻¹. Humedad antecedente: baja.

de lluvia, obtuvieron para suelos con secuencia trigo/soja en siembra directa continua durante 6 años en la EEA Marcos Juárez valores de infiltración final de alrededor de 18 mm h^{-1} .

En el bosque nativo se efectuaron mediciones de 35, 65, 85, 130, 180 y 200 mm h^{-1} de lluvia simulada, las cuatro primeras en condiciones de suelo seco y las dos últimas con una humedad de $w=17\%$. En estos ensayos sólo se observó la etapa de descenso de la velocidad de infiltración cuando los valores de intensidad impuestos fueron superiores a 130 mm h^{-1} (Figura 5). A intensidades de lluvia iguales o inferiores a 130 mm h^{-1} , con suelo seco, no se presentó este comportamiento en la dinámica de la infiltración en el lapso de 1 h de ensayo, permaneciendo constante la magnitud de la velocidad de infiltración, con valores en el orden de la intensidad de lluvia aplicada, que superaron ampliamente el valor de infiltración final que alcanza el proceso a intensidades mayores (Figura 4). Estas diferencias dan cuenta de la existencia de un valor crítico de energía de lluvia acumulada, en el cual se produce un cambio físico-químico de los agregados del suelo, cambios que provocan la dispersión de las partículas, generando un sellado superficial que reduce la infiltrabilidad del suelo.

Los valores de infiltración final obtenidos en este ecosistema (BN) fueron del orden de 31 mm h^{-1} con lluvias simuladas superiores a 180 mm h^{-1} (Figura 5) y si bien son significativamente menores a otros suelos de bosques similares al analizado, en los cuales se determinaron valores de infiltración básica del orden de 100 mm h^{-1} (Pachecoy *et al.*, 1996) y 180 mm h^{-1} (Cisneros *et al.*, 1997), la infiltración final del BN superó marcadamente la de los sitios E3 y C7.

Las diferencias en los valores de infiltración final de E3 y C7 con respecto a BN se explican por el contenido significativamente mayor de materia orgánica en BN (Tabla 1), lo que redundaría en una mejor y más estable estructura. Por otra parte, los menores valores de índice de agregación (Tabla 1) de los sitios E3 y C7 se deben a manejos que provocan el descenso de los tenores húmicos y disminuyen el equilibrio entre macro y microporos, llevando a una pulverización de los materiales por desagregación (Pilatti *et al.*, 1988). Este comportamiento también está demostrado si se considera la densificación superficial (Tabla 1). Esta densificación superficial, que tiene relación con la porosidad total, es marcadamente diferente entre el bosque nativo y la microcuencia, aunque también, desde el punto de vista físico, el sitio de ensayo C7 tiende a diferenciarse de E3. Evidentemente en la microcuencia el efecto del impacto de la gota de lluvia, sumado al humedecimiento y estallido de los agregados durante el hu-

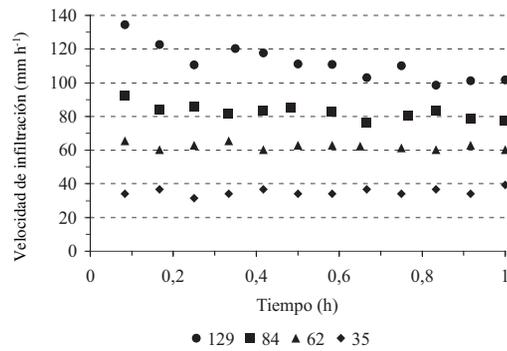


Figura 4. Valores experimentales de la velocidad de infiltración en el tiempo para el sitio de ensayo BN con intensidad de lluvia simulada de 129, 84, 62 y 35 mm h^{-1} . Humedad antecedente: baja.

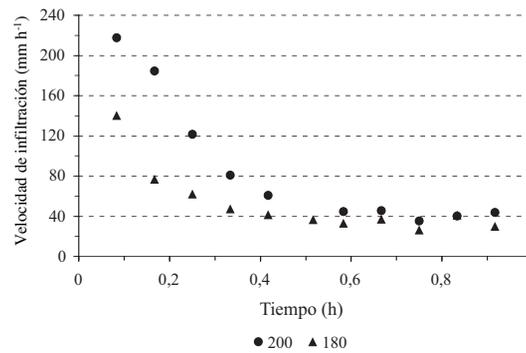


Figura 5. Valores experimentales de la velocidad de infiltración en el tiempo para el sitio de ensayo BN con intensidad de lluvia simulada de 200 y 180 mm h^{-1} . Humedad antecedente: alta.

medecimiento (Moore, 1981), produce un taponamiento de los poros superficiales que provoca una disminución más rápida de la velocidad de infiltración comparado con el suelo del bosque nativo.

Descripción del proceso de infiltración de agua en el suelo

Se observa en la Figura 6 que "aparentemente" tanto la ecuación de Philip (Ecuación 1) como la ecuación de Horton (Ecuación 2) ajustan de forma adecuada el proceso experimental desde el momento en que el exceso de agua aparece en la superficie del suelo; los valores de R^2 de ambas estimaciones superan 0,95 ($P < 0,01$). Sin embargo, es posible notar que la ecuación de Philip sobrestima la infiltración en las etapas tempranas del proceso. Además, el valor de la sortividad obtenido para la ecuación de Philip es elevado para un suelo franco limoso (Bach *et al.*, 1986). Por otra parte, y en un aspecto más crítico aún, todos los ajustes realizados empleando la ecuación de Philip brindaron valores

negativos del parámetro de infiltración relacionado con la infiltración final (A), lo cual carece de sentido físico, ya que ello supondría que el agua atravesaría la interfase atmósfera-suelo en un sentido contrario al proceso natural.

La ecuación de Horton, además de brindar un adecuado ajuste estadístico ($R^2=0,99$; $P<0,01$) describe correctamente el proceso de infiltración de agua en todo el rango de valores experimentales impuestos. De esta manera, la ecuación de Horton es la que mejor simula las modificaciones de porosidad y estructura superficial que se van produciendo durante el proceso de infiltración. Tal como afirman Parr & Bertrand (1960), aquellos factores que afectan el tamaño y distribución de los poros determinan en gran parte la tasa de movimiento de agua en el suelo, y ante cualquier cambio o tratamiento que resulte en un decrecimiento en el tamaño de los poros, causará un decrecimiento en la tasa de infiltración. En este sentido, es importante destacar la formación de sellos superficiales como aquellos procesos de significativa importancia que provocan un reordenamiento de las partículas de suelo y, en consecuencia, una modificación de la porosidad superficial.

Análisis de las variables i_f , $(i_f - i_i)$ y β de la ecuación de Horton

Para los sitios E3 y C7, los modelos multifactoriales mostraron que no existe interacción entre los factores sitio, intensidad de lluvia simulada y humedad antecedente que afecte en forma significativa a las variables i_f , $(i_f - i_i)$ y b . Sin embargo, del análisis unifactorial de cada variable se desprende que:

La variable i_f (relacionada con la infiltración final del suelo) no fue afectada en forma significativa por los mencionados factores. Es decir que, indepen-

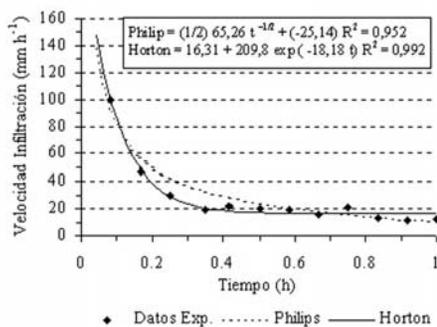


Figura 6. Descripción del proceso de infiltración mediante las ecuaciones de Philip y de Horton en el sitio de ensayo C7, con una lluvia simulada de 135 mm h^{-1} . Humedad antecedente: alta.

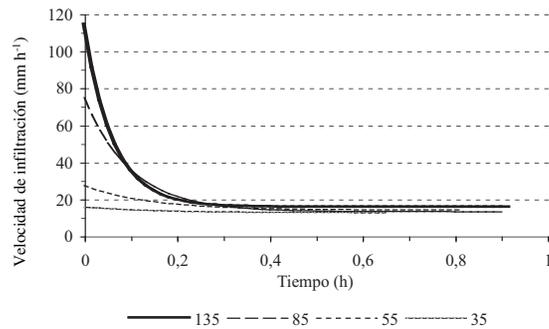


Figura 7. Simulación de la velocidad de infiltración en el tiempo para intensidades de 135 , 85 , 55 y 35 mm h^{-1} de lluvias simuladas en el mismo sitio de ensayo (C7) e igual humedad antecedente (seco). $R^2 = 0,99$ ($P < 0,01$) para todos los ajustes.

dientemente del sitio de ensayo (E3 o C7), de la intensidad de lluvia simulada y de la humedad antecedente, la infiltración final del suelo en la microcuenca no presentó diferencias significativas. Esto se debe a que el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre estos suelos con bajo contenido de materia orgánica (Tabla 1) y una textura con elevada cantidad de limo (Tabla 1), favorece la formación de un sellado superficial. Esto coincide con lo encontrado por Bricchi *et al.* (1996) quienes determinaron que para un suelo Haplustol típico franco grueso en rotación maní-soja, la infiltración está fuertemente condicionada por la formación y conductividad del sello superficial.

La variable $(i_f - i_i)$ no fue afectada en forma significativa ni por el sitio ($P = 0,28$) ni por la humedad antecedente ($P = 0,75$), pero dependió de la intensidad de lluvia simulada ($P < 0,01$). Las diferencias en $(i_f - i_i)$ se deben a que las distintas intensidades de lluvia simulada observadas entre las distintas experiencias afectaron significativamente la i_f (Figura 7). Esto sugiere que uno de los sitios de ensayo posee mayor infiltración inicial, aun con intensidades de lluvias simuladas elevadas. De aquí surge la necesidad de analizar con mayor detalle lo que sucede en los distintos sitios de ensayo antes que comience el escurrimiento, porque seguramente a nivel de condiciones de estructura inicial del suelo, antes de la saturación y/o formación del sello superficial, los sitios de ensayos en la microcuenca presentaban diferencias.

La variable β no fue afectada en su comportamiento por ninguno de los factores mencionados, es decir que la dinámica de la disminución de la velocidad de infiltración en los sitios E3 y C7 es la misma para las cuatro intensidades de lluvia simulada, las dos humedades antecedentes y los dos sitios. Esto indica que una vez que se produce la satura-

ción de los primeros milímetros del suelo y/o la dispersión de las partículas por efecto de las gotas de lluvia, la variable b es similar para ambos sitios de ensayo. En la Figura 7 pueden observarse los patrones de comportamiento de la dinámica de descenso de la velocidad de infiltración para el sitio C7 con baja humedad antecedente.

Los valores estimados del parámetro β fueron de $-8 \pm 2 \text{ min}^{-1}$ cuando el perfil está en condiciones más secas y de $-12 \pm 8 \text{ min}^{-1}$ cuando se encuentra más húmedo. Esta variable aparentemente se comporta como el factor de estabilidad estructural del suelo en la ecuación de Eigel & Moore (1983) y parece indicar, en este caso, que con el agroecosistema en condiciones de suelo seco, los agregados son más susceptibles a la dispersión por el impacto de la gota de lluvia y por su humedecimiento rápido.

CONCLUSIONES

A partir de las mediciones en campo con el microsimulador de lluvias, se observó que:

La velocidad final de infiltración del agua en el suelo, estimada con microsimulador de lluvias, se comportó como indicador de calidad de suelo válido para detectar diferencias significativas en las propiedades físicas y químicas de horizonte superficial de un suelo Haplustol típico en condiciones de bosque nativo y en un agroecosistema manejado con labranza convencional.

Las diferencias significativas encontradas en las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial de un suelo Haplustol típico, ubicado en dos ambientes contrastantes de un agroecosistema manejado con labranza convencional, no se reflejaron en el proceso de infiltración.

La ecuación de Horton describió mejor que la de Philip el proceso de infiltración de agua para el suelo y condiciones bajo estudio.

El descenso de la velocidad de infiltración en el agroecosistema no fue afectado por las distintas condiciones edáficas de los sitios, intensidad de lluvia simulada y humedad antecedente.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado con el apoyo económico de la SeCyT- UNCba. y del CONICET.

BIBLIOGRAFÍA

Achutegui, A., X. Abreu y M. L. Paéz, 1996. Diseño y evaluación de un simulador de lluvias tipo gotero con efecto vibratorio. *Venesuelos* 4:24-28.

- Aoki, A. M. y R. Sereno, 1999. Modificaciones de un microsimulador de lluvias. *Investigación agrícola (Chile)* 19:47-51.
- Bach, L. B., P. J. Wierenga y T. J. Ward, 1986. Estimation of the Philip infiltration parameters from rainfall simulation data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1319-1323.
- Bricchi, E.; F. Formia y J. Cisneros, 1996. Relación entre la condición superficial y el régimen hídrico en un Haplustol típico, bajo diferentes manejos. XIII Congreso Latinoamericano de Ciencia do Solo, Aguas de Lindoia, Brasil. Actas en CD-Room.
- Bryan, R. B. y J. De Ploey, 1983. Comparability of soil erosion measurements with different laboratory rainfall simulators. pp. 36-53. *In: Ploey, J., (ed). Rainfall Simulation, Runoff and Soil Erosion. Catena Supplement 4. Braunschweig.*
- Cisneros, J. M., C. Cholaky, E. Bricchi, O. Giayetto y J. J. Cantero, 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. *Rev. UNRC* 17:13-22.
- Da Silveira, A. L., J. A. Louza y L. F. Beltrame, 1993. Infiltração e armazenamento no solo. pp. 335-372. *In: Tucci, C.E.M., (ed.). Hidrologia: Ciencia e aplicação. Editora da Universidade, edusp, ABRH, Sao Paulo, Brasil.*
- Eigel J. D. y I. D. Moore, 1983. Effect of rainfall energy on infiltration into bare soil. *Proc. Nat. Conf. Adv. Infiltration, ASAE*, pp. 188-200.
- Epema, G. F. y H. Th. Riezebos, 1984. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. pp. 1-17. *In: Ploey, J. (ed). Rainfall Simulation, Runoff and Soil Erosion. Catena Supplement 4. Braunschweig.*
- Horton, R. E., 1940. An approach toward physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 5:399-417.
- Irurtia, C. B. y R. Mon, 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. *Publicación N° 176:1-18*. Instituto de suelos INTA-Castelar. Buenos Aires, Argentina.
- Kamphorst, A., 1987. A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility. *J. Agr. Sci.* 35:407-412.
- Klute, A. 1982. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. pp. 29-43. *In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Special Publ. N° 44. Madison, WI.*
- Marelli, J. H y J. Arce, 1995. Aportes en Siembra Directa. *Manual 12:1-40. Enciclopedia Agro de Cuyo. INTA Marcos Juárez. Córdoba, Argentina.*
- Meyer, L. D., 1994. Rainfall simulators for erosion research. pp. 83-103. *In: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods. USA.*
- Moore, I. D., 1981. Effect of surface sealing on infiltration.

- Trans. ASAE 24:1546-1552.
- Mwendera, E. J. y J. Feyen, 1993. Predicting tillage effects on infiltration. *Soil Sci.* 155:229-235.
- Osuma-Ceja, E. S. y J. S. Padilla-Ramírez, 1998. Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelos de la zona semiárida de México. *Terra* 6:293-302.
- Pacheco V., B. Jarsum, B. P. De La Cruz, J. L. Tassile, M. Carnero y R. Porcel De Peralta, 1996. Estudio y evaluación de la cuenca de aportes hídricos a la localidad de Laguna Larga. Departamento Río II. Provincia de Córdoba. Primera etapa. Diagnóstico general y propuesta agronómica. Grupo de trabajo SSGRR-INTA.
- Parr, J. F. y A. R. Bertrand, 1960. Water infiltration into soils. *Adv. Agr.* 12:311-363.
- Philip, J., 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* 83:345-357.
- Pilatti, M. A., J. A. De Orellana, L. J. Priano, O. M. Felli y D. A. Grenon, 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol en el sur de Santa Fé. *Ciencia del Suelo* 6:19-29.
- Pla Sentis, I. 1981, Simuladores de lluvia para el estudio de relaciones suelo-agua bajo agricultura de secano en los trópicos. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 12:81-93.
- Potter, K. N., H. A. Torbert y J. E. Morrison, 1995. Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. *Trans. ASAE* 38:1413-1419.
- Romero, L, H. Apezteguía, G. F. Esmoriz, R. Sereno, A. Aoki, M. Ateca, R. Mendoza y W. Robledo, 1995. Caracterización de una microcuenca agrícola de la zona central de la provincia de Córdoba (Argentina). *Agriscientia* 12:59-66.
- Rostagno, C. M. y D. Garayzar, 1995. Diseño de un simulador de lluvia para estudios de infiltración y erosión de suelos. *Ciencia del Suelo* 13:41-43.
- Roth, C. H. y T. Eggert, 1994. Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing, runoff generation and sediment concentration on loess soils. *Soil Till. Res.* 32:253-268.
- SAS Institute, 1989. SAS/STAT Guide for personal computers. Version 6.03. Cary, N.C. USA.
- Slatter, M. C. y R. B. Bryan, 1992. Laboratory experiments on surface seal development and its effects on interrill erosion processes. *J. Soil Sci.* 43: 517-529.
- White, I. y M. J. Sully, 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23:1514-1522.
- Zamora, E. M. y B. Jarsum, 1985. Mapa de erosión de la provincia de Córdoba. Plan mapa de suelos de la provincia de Córdoba, convenio INTA/SMAG y RR. Dirección de Recursos Renovables. Córdoba, Argentina. pp. 1-45.